



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

**SIMULÁTOR TYPICKÝCH PORUCH SOUČÁSTÍ
ROTAČNÍCH ZAŘÍZENÍ**

SIMULATOR OF TYPICAL ROTATIONAL MACHINERY COMPONENTS FAULTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Matej Vaľko

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Čala

BRNO 2020

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Matej Vaľko

ID: 203369

Ročník: 3

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Simulátor typických poruch součástí rotačních zařízení

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem bakalářské práce je tvorba knihovny v prostředí LabVIEW, jejímž účelem je simulace mechanických projevů (vibrací) různých mechanických součástí (hřídel, ložiska, ozubené a planetové převodovky, ...) při normálním provozu, ale také při specifikované poruše (nevývaha, mechanické poškození ložiska, mechanické poškození zubů, ...). Zadání lze shrnout do následujících bodů:

1. Popište mechanické součásti a teoretické vztahy pro určení jejich poruchových frekvencí.
2. Vytvořte model, který bude realizovat provoz mechanických součástí při normálním provozu i při specifikované poruše.
3. Porovnejte výstup vytvořeného modelu s dostupnými experimentálními daty.
4. Poznatky přehledně zdokumentujte a formulujte doporučení pro budoucí práci.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] TAYLOR, James I. The Vibration Analysis Handbook. 2nd edition. Vibration Consultants, 2003. ISBN 978-0964051720.

[2] GIRDHAR, Paresh. Practical machinery vibration analysis and predictive maintenance. Elsevier, 2004. ISBN 978-0750662758.

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 8.6.2020

Vedoucí práce: Ing. Martin Čala

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Cieľom tejto práce je vytvorenie knižnice v programovacom prostredí LabVIEW od firmy National Instruments, ktorej účelom je simulácia mechanických prejavov (vibrácií) rôznych mechanických súčastí ako sú napr. hriadeľ, valivé ložiská, ozubená a planetová prevodovka pri rôznych typoch poruchy. V teoretickej časti sú obsiahnuté informácie o typických poruchách týchto súčastí a ich poruchových frekvenciách vybrané z literatúry. V popise praktickej časti je popísaný už navrhnutý simulátor s užívateľským rozhraním v spomínanom prostredí LabVIEW. Výsledkom tejto práce je knižnica, ktorá znázorňuje časový priebeh vibrácií pre vybrané poruchy so spektrálnou analýzou týchto porúch.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

radiálny smer, axiálny smer, vibrácie, simulátor, frekvencia, LabVIEW, hriadeľ, ložisko, prevodovka, nevyváženie, ohnutie

ABSTRACT

The objective of this thesis is to create a library in programming environment LabVIEW by company National Instruments, which objective is to simulate vibrations of different mechanical components, such as shaft, rolling element bearings, plain gearing and planetary gearbox in different circumstances and failures. The theoretical part contains information about typical failures of this mechanical components and their typical failure frequencies obtained from literature. In the description of theoretical part is inscribed simulator with user interface in already mentioned programming environment LabVIEW. Result of this thesis is library, which images time course of vibrations and spectral analysis for different components with their respective failures.

KEYWORDS

radial direction, axial direction, vibrations, simulator, frequency, LabVIEW, shaft, bearing, gearbox, unbalance, bending

VAĽKO, Matej. *Simulátor typických poruch součastí rotačních zařízení*. Brno, 2020, 53 s. Bakalárska práca. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedúci práce: Ing. Martin Čala

VYHLÁSENIE

Vyhlasujem, že svoju bakalársku prácu na tému „Simulátor typických poruch součástí rotačních zařízení“ som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho bakalárskej práce, s využitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej bakalárskej práce ďalej vyhlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto bakalárskej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/alebo majetkových a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona Českej republiky č. 121/2000 Sb., o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), v znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníka Českej republiky č. 40/2009 Sb.

Brno 08.06.2020

.....
podpis autora

POĎAKOVANIE

Týmto by som rád poďakoval vedúcemu práce Ing. Martinovi Čalovi za vedenie pri tejto práci, konzultácie a pomoc pri návrhu v prostredí LabVIEW.

Brno 08.06.2020

.....

podpis autora

Obsah

Úvod	10
1 Popis mechanických súčastí a ich porúch	11
1.1 Vibrácie	11
1.2 Spektrálna analýza a Rýchla Fourierova transformácia - FFT	12
1.3 Hriadeľ a jeho poruchy	12
1.3.1 Nevyváženie	13
1.3.2 Ohnutý hriadeľ	14
1.3.3 Nezarovanie mechanických súčastí	15
1.4 Ložiská a ich poruchy	16
1.4.1 FTF - frekvencia odpovedajúca chybe kľetky ložiska	17
1.4.2 BPFO - frekvencia odpovedajúca chybe drážky pre valivé teleso - vonkajšia	18
1.4.3 BPFI - frekvencia odpovedajúca chybe drážky pre valivé teleso - vnútorná	19
1.4.4 BSF - frekvencia odpovedajúca chybe valivého telieska	19
1.4.5 Aplikácia vzťahov pre poruchové frekvencie	20
1.5 Prevodovky a ich poruchy	21
1.5.1 Ozubené prevodovky	23
1.5.2 Planetové prevodovky	24
1.6 Simulátory dostupné na trhu	25
2 Teoretický rozbor návrhu simulátora	26
2.1 Spoločné požiadavky všetkých mechanických súčastí	26
2.2 Požiadavky pre hriadeľ	27
2.3 Požiadavky pre ložiská	27
2.4 Požiadavky pre prevodovky	27
3 Návrh simulátora v LabVIEW	28
3.1 Programové riešenie pre nevyváhu hriadele	28
3.1.1 Statické nevyváženie	28
3.1.2 Párové nevyváženie	29
3.2 Programové riešenie pre ohnutie hriadeľa	31
3.2.1 Ohnutie hriadele v strede	31
3.2.2 Ohnutie hriadele na kraji	33
3.3 Programové riešenie pre nezarovanie mechanických súčastí	34
3.3.1 Uhlové nezarovanie	35

3.3.2	Paralelné nezarovnanie	36
3.4	Programové riešenie pre valivé ložiská	38
3.4.1	FTF - frekvencia odpovedajúca chybe kletky ložiska - vnútro	38
3.4.2	FTF - frekvencia odpovedajúca chybe kletky ložiska - vonkajšok	40
3.4.3	BPFO - frekvencia odpovedajúca chybe vonkajšej drážky ložiska	41
3.4.4	BPFI - frekvencia odpovedajúca chybe vnútornej drážky ložiska	43
3.4.5	BSF - frekvencia odpovedajúca chybe valivého telieska	44
3.5	Programové riešenie pre prevodovky	45
3.5.1	Nezarovnanie kolies prevodovky	45
3.5.2	Poškodenie zubov prevodovky	46
3.5.3	Zaťaženie zubov prevodovky	47
3.5.4	Planetové prevodovky	47
Záver		49
Literatúra		50
Zoznam symbolov, veličín a skratiek		52
A Obsah online prílohy a priloženého CD		53

Zoznam obrázkov

1.1	Typy hriadelov s popisom	12
1.2	Spektrálna analýza nevyváženia	13
1.3	Princíp merania nevyvážení	13
1.4	Spektrálna analýza ohnutého hriadeľa	14
1.5	Princíp uhlového nezarovnaní a jeho spektrálna analýza	15
1.6	Princíp paralelného nezarovnaní a jeho spektrálna analýza	15
1.7	Príklady v praxi používaných ložísk	16
1.8	Spektrálna analýza poškodení kľetky ložiska	18
1.9	Spektrálna analýza poškodení vonkajšej drážky ložiska	18
1.10	Spektrálna analýza poškodení vnútornej drážky ložiska	19
1.11	Spektrálna analýza poškodení valivého telieska ložiska	20
1.12	Príklady v praxi používaných prevodoviek	22
1.13	FFT analýza prevodovky za normálneho chodu	22
1.14	Spektrálna analýza prevodovky pri zatažení zubov	23
1.15	FFT analýza nezarovnaní pri prevodovke	23
1.16	Časový priebeh poškodení zubu prevodu	24
3.1	Predný panel VI pre analýzu statického nevyváženia	28
3.2	Predný panel VI pre analýzu statického nevyváženia	29
3.3	Časový priebeh a spektrálna analýza signálu statického nevyváženia	29
3.4	Predný panel VI pre analýzu párového nevyváženia	30
3.5	Blokový diagram VI pre analýzu párového nevyváženia	31
3.6	Predný panel VI pre analýzu ohnutej hriadele v strede	31
3.7	Predný panel VI pre analýzu ohnutej hriadele v strede	32
3.8	Časový priebeh a spektrálna analýza signálu ohnutej hriadele v strede	33
3.9	Predný panel VI pre analýzu ohnutej hriadele na kraji	33
3.10	Predný panel VI pre analýzu ohnutej hriadele na kraji	34
3.11	Časový priebeh a spektrálna analýza signálu ohnutej hriadele na kraji	34
3.12	Predný panel VI pre analýzu uhlového nezarovnaní	35
3.13	Predný panel VI pre analýzu uhlového nezarovnaní	36
3.14	Časový priebeh a spektrálna analýza signálu uhlového nezarovnaní	36
3.15	Predný panel VI pre analýzu paralelného nezarovnaní	37
3.16	Predný panel VI pre analýzu uhlového nezarovnaní	38
3.17	Časový priebeh a spektrálna analýza signálu paralelného nezarovnaní	38
3.18	Predný panel VI pre FTF analýzu - vnútro	39
3.19	Blokový diagram pre FTF analýzu - vnútro	40
3.20	Časový priebeh a spektrálna analýza signálu FTF - vnútro	40
3.21	Blokový diagram pre FTF analýzu - vonkajšok	41

3.22	Časový priebeh a spektrálna analýza signálu FTF - vonkajšok	41
3.23	Predný panel VI pre BPFO analýzu	42
3.24	Časový priebeh a spektrálna analýza signálu BPFO	43
3.25	Blokový diagram pre BPFI	44
3.26	Časový priebeh a spektrálna analýza signálu BPFI	44
3.27	Časový priebeh a spektrálna analýza signálu poškodených zubov pre- vodovky	46
3.28	Časový priebeh a spektrálna analýza signálu preťažených zubov pre- vodovky	47

Úvod

S mechanickými súčastami sa stretávame každý deň bez toho, aby sme si to nejako zvlášť uvedomovali. Či už je to v dopravných prostriedkoch ktoré používame každý deň, alebo ich niektorí z nás ich využívajú aj pri svojej práci. Preto je potrebné rozpoznať ich správanie v rôznych situáciách, to znamená pri bežnej činnosti ale aj poruche. Najčastejším prejavom poruchy sú vibrácie danej mechanickej súčasti a tým aj celého mechanického systému, kde daná súčasť plní určitú úlohu. Diagnostika a napravenie týchto porúch sú kľúčové, nakoľko v mnohých prípadoch to môže viesť k porúcham väčším a tým pádom aj finančným škodám, v prípadoch horších k úrazom a stratám ľudských životov.

Firma National Instruments vytvorila prostredie LabVIEW, ktorého primárnou úlohou je programovo spracovať namerané dáta z nimi dodaného hardvéru. Toto prostredie však oproti iným ponúka lepšie možnosti pre vytvorenie rôznych simulácií, nakoľko už obsahuje vopred vytvorené súčasti, ktoré môžeme priamo implementovať pri našich simuláciách a uľahčiť nám tak prácu oproti iným prostrediam dostupným na trhu.

V prvej časti tejto práce sú popísané vybrané mechanické súčasti a ich poruchové frekvencie pre vybrané poruchy. Nasledujúca časť sa venuje teoretickému rozboru návrhu simulátora týchto vybraných súčastí. V ďalšej časti je popísaný samotný návrh a výsledky získané zo simulátora samotného. V poslednej časti je záver a zároveň sú navrhnuté ďalšie vylepšenia tohto simulátora, ktoré je možné dopniť v budúcej práci.

1 Popis mechanických súčastí a ich porúch

Medzi veľmi často používané mechanické súčasti patrí hriadeľ, prevodovky a ložiská. Na každom z nich sa môže vyskytovať široká škála porúch a každá z týchto mechanických súčastí má rozličné vlastnosti, a pre ďalšie pochopenie ich porúch je potrebné poznať ich funkciu a vlastnosti.

1.1 Vibrácie

Vibrácie sú dynamický jav, pri ktorom hmotné body alebo tuhé telesá vykonávajú vratný pohyb okolo kludovej rovnovážnej polohy. Rovnovážna poloha telesa je podmienená nulovou hodnotou pôsobiacich síl a naopak kmitanie telesa je vždy spôsobené budiacou silou, ktorá môže pôsobiť ako externe, tak aj interne. [3]

Hodnoty veličín mechanických vibrácií sú dané budiacou silou, jej smerom a frekvenciou. Vibrácie telesa sú dané kombináciou šiestich pohybov a to posunom v ortogonálnej (pravouhlej) sústave súradníc x , y , z a rotáciou okolo os x , y , z , čiže mechanický systém má šesť stupňov voľnosti. [3]

Vibrácie mechanických sústav (strojov) sú úzko zviazané s dynamickým namáhaním sústav a technickým namáhaním hriadeľov, ložísk, prevodoviek, nevyváženosti rotujúcich dielov, vôlami v ložiskách, únavou materiálu atď. Podľa časových zmien veličín majú vibrácie charakter javu periodického, neperiodického alebo náhodného. U periodických vibrácií sa časový priebeh vibrodiagnostických veličín opakuje. Harmonické vibrácie sú periodické vibrácie obsahujúce jedinou frekvenciu a sú dané vzťahom: [3]

$$x = x_0 \sin(\omega t + \varphi) \quad [x/t] \quad [3] \quad (1.1)$$

Zložené vibrácie sú vibrácie dané superpozíciou rôznych časových priebehov a môžu byť ako periodické tak neperiodické. Sú dané vzťahom [3]:

$$x = x_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1) + \dots + x_n \sin(\omega_n t + \varphi_n) \quad [x/t] \quad [3] \quad (1.2)$$

Periodické zložené vibrácie vzniknú superpozíciou harmonických vibrácií, ktorých periódy sú v pomerochdaných racionálnymi číslami. Ak je jediný pomer zložiek zložených vibrácií vyjadrený iracionálnym číslom, sú vibrácie neperiodické. [3]

1.2 Spektrálna analýza a Rýchla Fourierova transformácia - FFT

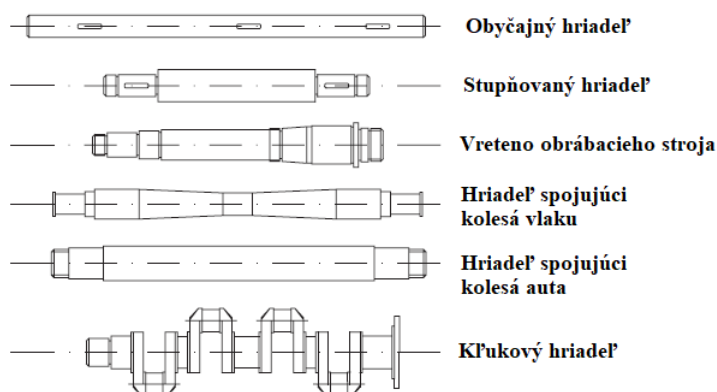
Spektrálna analýza slúži k popisu ľubovoľného signálu pomocou jeho harmonických zložiek v spektrálnej oblasti. Spektrami signálu sa je potrebné zaoberať v zmysle Rýchlej Fourierovej transformácie.[9] Pomocou tejto transformácie je možné identifikovať harmonické zložky ľubovoľného signálu, a tým aj vlastne identifikovať určitú poruchu mechanickej súčasti.

Priebeh signálu sa obvykle znázorňuje v čase, inak povedané v časovej oblasti - doméne. Ak sa u súboru harmonických signálov znázorní závislosť amplitúdy a počiatočnej fázy na frekvencií, potom je signál znázornený vo frekvenčnej oblasti - doméne. Rozklad periodickej funkcie so spojitým časom na kombinácií harmonických signálov sa nazýva Fourierova (nekonečná) rada. Pre obecné neperiodické funkcie sa používa Fourierova transformácia. [4]

Pri výpočte spektra $F(m)$ na číslicovom počítači musíme vykonať N násobení pre výpočet každej frekvenčnej zložky, a teda pre výpočet celého spektra celkovo N^2 násobení. Pre veľký počet vzorkov N by mohol výpočet trvať dlho. Preto boli hľadané efektívnejšie algoritmy výpočtu. Algoritmus nazvaný Rýchla Fourierova transformácia z ang. *Fast Fourier transform FFT*, ktorý postupne rozdeľuje počet vzoriek na polovice a využíva periodickosti komplexnej exponenciálnej postupnosti.[7]

1.3 Hriadeľ a jeho poruchy

Termín hriadeľ zvyčajne odkazuje na mechanickú súčasť kruhového prierezu, ktorá sa otáča a prenáša silu zo zdroja (elektromotor, spalovací motor, ...) na ďalšie mechanické súčasti (prevodovky, remene, reťaze, ďalší hriadeľ, ...).

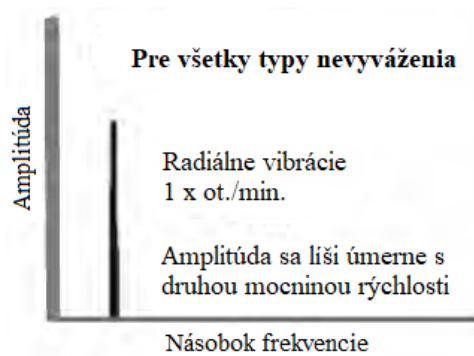


Obr. 1.1: Typy hriadeľov s popisom [6]

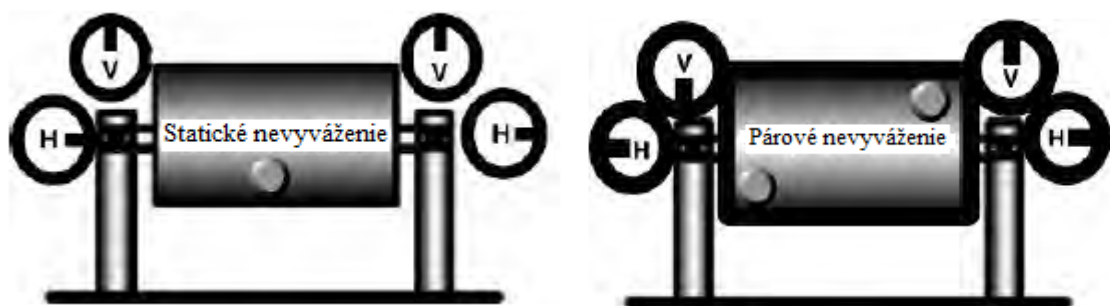
Typicky pozostávajú z rôznych odstupňovaných priemerov, ktoré môžu slúžiť ako ramená s určitým priemerom potrebným pre umiestnenie ložísk, vďaka čomu sa hriadeľ môže otáčať. Druhou funkciou týchto ramien môže byť umiestnenie prepojenia na prevodovky, remene, prípadne ďalší hriadeľ. Hriadeľ musí byť dimenzovaná tak, aby znášala namáhanie v určitých medziach. Ich prekročenie by znamenalo zníženie prenášaného výkonu, čo by sa prejavilo vedľajšími účinkami ako hluk a vibrácie. V praxi sa používa množstvo hriadelov, príklady z nich môžeme nájsť na Obr. 1.1.

1.3.1 Nevyváženie

Jednoduchou definíciou nevyváženia je, že je to nerovnomerné rozloženie hmoty okolo osi rotácie hriadele alebo rotora. Nevyváženie je jednou z najčastejšie sledovaných porúch pri mechanických súčiastiach, ale je však ľahko zistiteľná a napravitelná. [1]



Obr. 1.2: Spektrálna analýza nevyváženia [1]



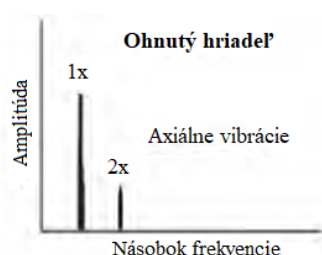
Obr. 1.3: Princíp merania nevyvážení [1]

Pre lepšie porozumenie problematiky nevyváženia je potrebné zaviesť nové terminológie. Prvou je rotačná os otáčania (z ang. *principle inertia axis* alebo PIA). Je to os, okolo ktorej by sa hriadeľ alebo rotor otáčal, ak by nebol obmedzený ložiskami. Druhou je geometrická os otáčania (z ang. *geometric centerline* alebo GCL), pričom táto os je fyzickou osou hriadele a rotora. Pri pretínaní týchto dvoch osí nevzniká žiaden problém, zariadenie pracuje tak ako má. Nepretínanie týchto dvoch osí znamená že hriadeľ alebo rotor je v stave nevyváženia. Na mechanických súčiastiach sa môžeme stretnúť s tromi stavmi nevyváženia: statické nevyváženie, párové nevyváženie a dynamické nevyváženie, z ktorých budeme popisovať prvé dve spomínané. [1]

Statické nevyváženie vo výstupe frekvenčnej analýzy vykazuje jednu dominantnú frekvenciu, ktorá je úmerná frekvencií otáčok hriadele alebo rotora, viď. Obr. 1.2. Statické nevyváženie je vo fáze stále rovnaké, v rozsahu 15 – 20 stupňov. Z Obr. 1.3 je zrejmé, že statické nevyváženie spôsobuje nerozloženie jednej hmoty na hriadeľ. Písmenom V a H sú na obrázku označené snímače, ktoré predstavujú meranie v horizontálnom a vertikálnom smere, pričom sú v praxi pri meraní navzájom posunuté o 90 stupňov, a to z dôvodu obmedzenia chyby pri meraní (silnejší výstupný signál je pre nás zaujímavý, slabší nie). [1]

Párové nevyváženie a výstup jeho frekvenčná analýza opäť vykazuje jednu dominantnú frekvenciu úmernú frekvencií otáčok hriadele alebo rotora, viď. Obr. 1.2. Rozdielom oproti statickému nevyváženiu je však vo fáze, ktorá je v tomto prípade okolo 180 stupňov. Z Obr. 1.3 je zrejmé, že párové nevyváženie spôsobuje nerozloženie dvoch hmôt na hriadeľ. Meranie vibrácií je realizované obdobným spôsobom ako pri statickom nevyvážení. [1]

1.3.2 Ohnutý hriadeľ



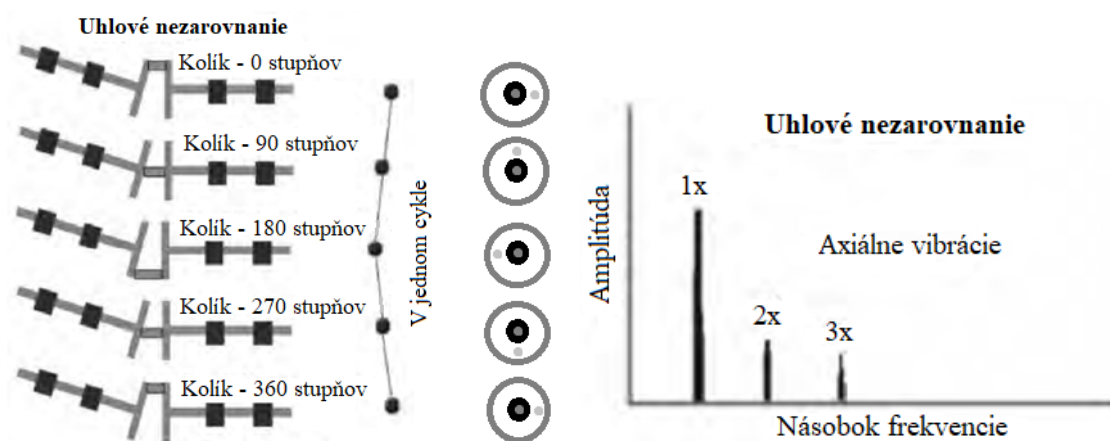
Obr. 1.4: Spektrálna analýza ohnutého hriadeľa [1]

Pri ohnutom hriadeľi zaznamenávame veľké vibrácie v axiálnom aj radiálnom smere, merané frekvenčné spektrum zvyčajne obsahuje 2 zložky, viď. Obr. 1.4. Pri domi-

nancií prvého násobku otáčok za minútu hriadeľa môžeme tvrdiť, že ohnutie sa nachádza blízko stredu hriadeľa. V prípade dominancie druhého násobku otáčok za minútu hriadeľa sa ohnutie nachádza blízko jedného z koncov hriadeľa. Fázový rozdiel je 180 stupňov pre radiálny aj axiálny smer. [1]

1.3.3 Nezarovanie mechanických súčastí

Nezarovanie mechanických súčastí je jedna z najčastejších porúch sledovaná pri mechanických súčastiach. V niektorých prípadoch majú mechanické súčasti v sebe tzv. „samozarovňavacie“ ložiská a pohyblivé spojky, ktorým malé nezarovanie ne- vadí a dokážu ho kompenzovať. Týmto opatrením však nie je možné pokryť všetky prípady v praxi a tým pádom nie je nezvyčajným naraziť na veľké vibrácie spôsobené nezarovaním. [1]



Obr. 1.5: Princíp uhlového nezarovania a jeho spektrálna analýza [1]

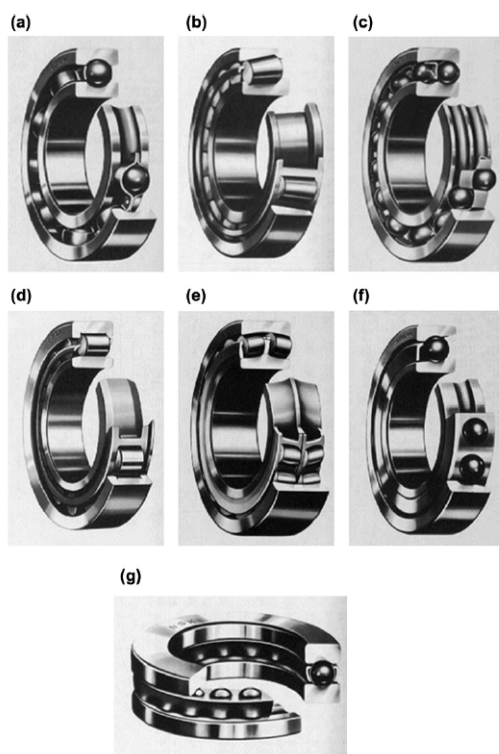


Obr. 1.6: Princíp paralelného nezarovania a jeho spektrálna analýza [1]

Pri nezarovnaní mechanických súčastí sa stretávame s dvomi základnými typmi a to uhlovým nezarovnaním a paralelným nezarovnaním. Pre príklad uhlového nezarovnaní si jako príklad môžeme predstaviť spojenie dvoch hriadelí, ktoré sa pri nezarovnaní stretávajú pod určitým uhlom, viď. Obr. 1.5. Frekvenčné spektrum zvyčajne obsahuje tri harmonické, minimálny počet je však dva. Fázový rozdiel bude 180 stupňov pri axiálnom meraní na ložiskách dvoch súčastí spojených spojkou. [1]

Paralelné nezarovnanie sa prejavuje dorazmi, dvomi za jeden cyklus (tj. jednu otáčku), a tým pádom je frekvencia vibrácií dvojnásobkom frekvencie otáčania. Princíp paralelného nezarovania je vysvetlený na obrázku 1.6. Ohnutý hriadeľ a nezarovanie majú podobné frekvenčné spektrum. Rozdiel medzi nimi je znateľný len pomocou fázovej analýzy. Fázový rozdiel je pri paralelnom nezarovaní približujúci sa k 180 stupňom. [1]

1.4 Ložiská a ich poruchy



Obr. 1.7: Príklady v praxi používaných ložísk ((a) Guľôčkové ložisko s hlbokou drážkou; (b) Kužeľové ložisko; (c) Samovyrovnávacie guľôčkové ložisko; (d) Valčekové ložisko; (e) Súdkové ložisko; (f) Guľôčkové ložisko s kosouhlým stykom; (g) Axiálne guľôčkové ložisko) [5]

Pojem ložiská, konkrétne v našom prípade ložiská s rotačnými telieskami predstavujú mechanickú súčasť, ktorá využíva nejaký druh rotačného telieska (valčeky, guľičky, atď.) medzi jeho statickou a rotujúcou časťou k rotačnému pohybu. Vo väčšine prípadov sú odolné na namáhanie v radiálnom aj axiálnom smere, avšak môžu byť dimenzované aj len na namáhanie v jednom z týchto smerov. Najčastejšie sa ložiská používajú v spojení s hriadeľmi v rôznych mechanických aplikáciach. Poznáme rôzne typy týchto ložísk, viď. Obr. 1.7.

Ložiská z rotačnými telieskami sa skladajú z vnútornej a vonkajšej drážky, kletky (obalu) a z už spomenutých pohybujúcich sa (rotačných) teliesok. Porucha môže nastať na každej z týchto častí, pričom spôsobí vysokofrekvenčné vibrácie. Vo väčšine prípadov je možné určiť chybnú časť ložiska z frekvencií, ktoré sú generované poruchou. V prípade ložísk neexistujú metódy, ktoré by určili, kedy táto chybná časť dokáže spôsobiť vážnejšiu poruchu. [1] Nasledujúce podkapitoly a k nim priradené vzťahy slúžia na určenie poruchových frekvencií jednotlivých častí tohoto druhu ložísk. Prípady pre základné poruchy valivých ložísk sú popísané v nasledujúcich štyroch podkapitolách.

1.4.1 FTF - frekvencia odpovedajúca chybe kletky ložiska

Frekvencia odpovedajúca chybe kletky ložiska je ekvivalentná jednotlivým uhlovým rýchlostiam rotačných teliesok, konkrétne ich stredov. Túto rýchlosť je možné popísať ako [2]:

$$v_c = \frac{v_i + v_o}{2} \quad [m/s] \quad [2] \quad (1.3)$$

Veličiny vo vzťahu sú: v_i odpovedá rýchlosti valivého telieska na vnútornej strane drážky, v_o je rýchlosť valivého telieska na vonkajšej strane drážky a v_c je rýchlosť stredu valivého telieska.

Táto rýchlosť je však lineárna, avšak nás zaujíma uhlová rýchlosť ω . Tá je definovaná ako lineárna rýchlosť na polomere r [2]:

$$\omega = \frac{v}{r} \quad [rad/s] \quad [2] \quad (1.4)$$

Z toho teda dostávame vzťah pre uhlovú rýchlosť valivého ložiska:

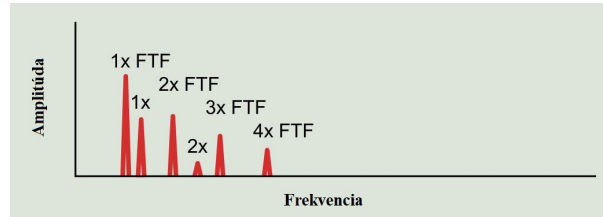
$$\omega = \frac{\frac{v_i + v_o}{2}}{\frac{d_l}{2}} \quad [rad/s] \quad [2] \quad (1.5)$$

Veličiny vo vzťahu sú: v_i a v_o sú už spomenuté v popise predošlého vzťahu, d_l je priemer ložiska od jeho stredu po stred valivého telieska a ω_c je uhlová rýchlosť stredu valivého telieska.

Vzťah pre frekvenciu odpovedajúcu chybe kletky ložiska je:

$$FTF = \frac{1}{2} \left[\omega_i \left(1 - \frac{d_b \cos \phi}{d_l} \right) + \omega_o \left(1 + \frac{d_b \cos \phi}{d_l} \right) \right] \quad [Hz] \quad [2] \quad (1.6)$$

Veličiny vo vzťahu sú: d_b je priemer valivého telieska, ω_i a ω_o sú uhlové rýchlosti na vnútornej a vonkajšej drážke, ich výpočet je obdobný ako pri výpočte rýchlosti ω_c . Uhol ϕ vyjadruje uhol dotyku medzi valivým telieskom a drážkou. Spektrálna analýza poškodenia kletky ložiska je na Obr. 1.8.



Obr. 1.8: Spektrálna analýza poškodenej kletky ložiska [10]

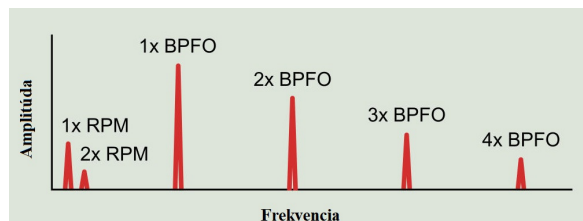
1.4.2 BPFO - frekvencia odpovedajúca chybe drážky pre valivé teleso - vonkajšia

Frekvencia odpovedajúca chybe vonkajšej drážky pre valivé teleso je definovaná ako frekvencia prechádzajúcich teliesok cez jeden bod vonkajšej drážky. Spektrálna analýza poškodenia kletky ložiska je na Obr. 1.9. Dá sa aj vyjadriť ako počet teliesok N_b vynásobený rozdielom uhlových rýchlostí (frekvencií) medzi stredom telieska a vonkajškom drážky ω_c a ω_o [2]:

$$BPFO = N_b |\omega_c - \omega_o| \quad [Hz] \quad [2] \quad (1.7)$$

Tento vzťah sa dá prepísať podobným spôsobom ako pri FTF, z čoho nám po celkovej úprave výjde výsledný vzťah pre BPFO [2]:

$$BPFO = \left| \frac{N_b}{2} (\omega_i - \omega_o) \left(1 - \frac{d_b \cos \phi}{d_l} \right) \right| \quad [Hz] \quad [2] \quad (1.8)$$



Obr. 1.9: Spektrálna analýza poškodenej vonkajšej drážky ložiska [10]

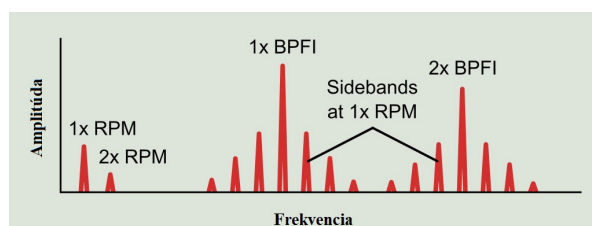
1.4.3 BPFI - frekvencia odpovedajúca chybe drážky pre valivé teleso - vnútorná

Frekvencia odpovedajúca chybe vnútornej drážky pre valivé teleso je definovaná ako frekvencia prechádzajúcich teliesok cez jeden bod vnútornej drážky. Spektrálna analýza poškodenia kletky ložiska je na Obr. 1.10. Dá sa vyjadriť aj ako počet teliesok N_b vynásobený rozdielom uhlových rýchlostí (frekvencií) medzi stredom telieska a vnútorným drážky ω_i a ω_c [2]:

$$BPFO = N_b |\omega_i - \omega_c| \quad [Hz] \quad [2] \quad (1.9)$$

Tento vzťah sa dá prepísať podobným spôsobom ako pri FTF, z čoho nám po celkovej úprave výjde výsledný vzťah pre BPFI [2]:

$$BPFI = \left| \frac{N_b}{2} (\omega_i - \omega_o) \left(1 + \frac{d_b \cos \phi}{d_l} \right) \right| \quad [Hz] \quad [2] \quad (1.10)$$



Obr. 1.10: Spektrálna analýza poškodenej vnútornej drážky ložiska [10]

1.4.4 BSF - frekvencia odpovedajúca chybe valivého telieska

Uhlová rýchlosť ω valivého telieska okolo svojho stredu môže byť vyjadrená dvomi spôsobmi. Prvý z nich je, keď do úvahy berieme lineárnu rýchlosť bodu na vnútornej strane drážky v kontakte s povrchom valivého telieska, tak rýchlosť tohto bodu je popísaná ako [2]:

$$v_b = (\omega_i - \omega_c) r_i \quad [m/s] \quad [2] \quad (1.11)$$

Veličiny vo vzťahu sú: r_i je polomer vnútornej drážky. Uhlová rýchlosť alebo BSF je potom:

$$BSF = \left| (\omega_i - \omega_c) \frac{r_i}{r_b} \right| \quad [Hz] \quad [2] \quad (1.12)$$

alebo:

$$BSF = \left| (\omega_i - \omega_c) \left[\frac{\frac{d_l - d_b \cos \phi}{2}}{\frac{d_b}{2}} \right] \right| \quad [Hz] \quad [2] \quad (1.13)$$

kde r_b je polomer valivého telieska. Posledný vzťah môže byť prepísaný použitím vzťahu pre FTF[2]:

$$BSF = \left| \frac{d_l}{2d_b} (\omega_i - \omega_o) \left(1 - \frac{d_b^2 \cos^2 \phi}{d_l^2} \right) \right| \quad [Hz] \quad [2] \quad (1.14)$$

Druhý z prípadov je, keď do úvahy berieme lineárnu rýchlosť bodu na vonkajšej strane drážky v kontakte s povrchom valivého telieska, tak rýchlosť tohto bodu je popísaná ako [2]:

$$v_b = (\omega_c - \omega_o) r_o \quad [m/s] \quad [2] \quad (1.15)$$

Veličiny vo vzťahu sú: r_o je polomer vnútornej drážky. Z toho vyplýva:

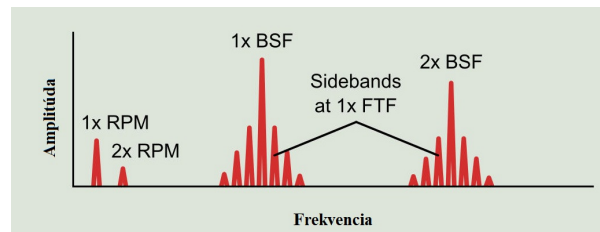
$$BSF = \left| (\omega_c - \omega_o) \frac{r_o}{r_b} \right| \quad [Hz] \quad [2] \quad (1.16)$$

Vzťah pre BSF môže byť prepísaný nasledujúcim spôsobom, ktorý je vo výsledných úpravách rovnaký ako vzťah pre prvý prípad [2]:

$$BSF = \left| \left(\frac{\omega_i - \omega_o}{2} \right) \left(1 - \frac{d_b \cos \phi}{d_l} \right) \left(\frac{d_l + d_b \cos \phi}{d_b} \right) \right| \quad [Hz] \quad [2] \quad (1.17)$$

$$BSF = \left| \frac{d_l}{2d_b} (\omega_i - \omega_o) \left(1 - \frac{d_b^2 \cos^2 \phi}{d_l^2} \right) \right| \quad [Hz] \quad [2] \quad (1.18)$$

Spektrálna analýza poškodenia kliečky ložiska je na Obr. 1.11:



Obr. 1.11: Spektrálna analýza poškodenia valivého telieska ložiska [10]

1.4.5 Aplikácia vzťahov pre poruchové frekvencie

Výsledné vzťahy pre FTF, BPFO, BPFI a BSF už popísané uvažujú prípady, kde je pohyblivá vonkajšia alebo vnútorná časť ložiska, prípadne obe zároveň. Taktiež

ložisko môže mať ako valivé telieska gulôčky alebo valčeky, a uhol dotyku môže byť nulový ako v prípade ložísk s hlbokými drážkami.[2]

Pre prípad, kde vonkajšia časť ložiska je statická, tj. $\omega_o = 0$ a vnútorná je pohyblivá, tj. $\omega_i = S$, kde S je uhlová rýchlosť alebo rýchlosť rotačného systému sa vzťahy pre FTF, BPFO, BPFI a BSF dajú zjednodušiť na [2]:

$$FTF = S \left(\frac{1}{2} \left(1 - \frac{d_g \cos \phi}{d_l} \right) \right) \quad [Hz] \quad [2] \quad (1.19)$$

$$BPFO = S \left(\frac{N_b}{2} \left(1 - \frac{d_g \cos \phi}{d_l} \right) \right) \quad [Hz] \quad [2] \quad (1.20)$$

$$BPFI = S \left(\frac{N_b}{2} \left(1 + \frac{d_g \cos \phi}{d_l} \right) \right) \quad [Hz] \quad [2] \quad (1.21)$$

$$BSF = S \left(\frac{d_l}{2d_g} \left(1 - \frac{d_g^2 \cos^2 \phi}{d_l^2} \right) \right) \quad [Hz] \quad [2] \quad (1.22)$$

Obdobne pre prípad, kde vonkajšia časť ložiska je pohyblivá, tj. $\omega_o = S$ a vnútorná je statická, tj. $\omega_i = 0$, kde S je uhlová rýchlosť alebo rýchlosť rotačného systému sa vzťahy pre FTF, BPFO, BPFI a BSF dajú zjednodušiť na [2]:

$$FTF = S \left(\frac{1}{2} \left(1 + \frac{d_g \cos \phi}{d_l} \right) \right) \quad [Hz] \quad [2] \quad (1.23)$$

$$BPFO = S \left(\frac{N_b}{2} \left(1 - \frac{d_g \cos \phi}{d_l} \right) \right) \quad [Hz] \quad [2] \quad (1.24)$$

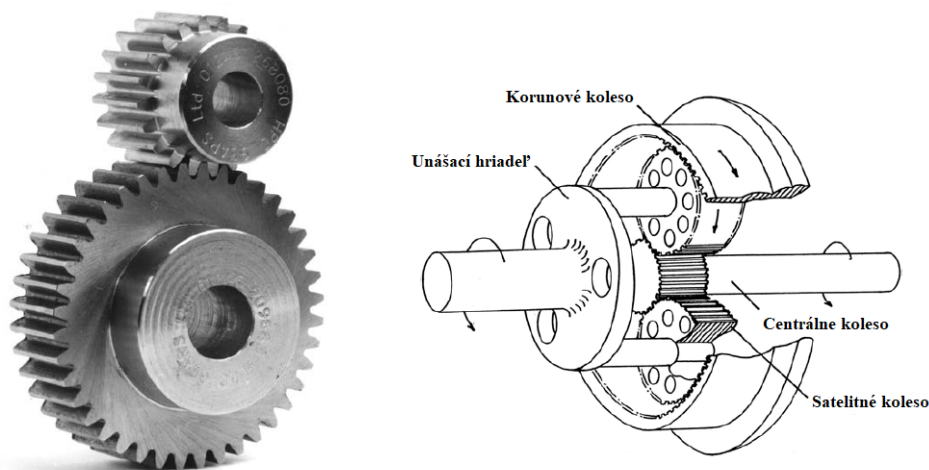
$$BPFI = S \left(\frac{N_b}{2} \left(1 + \frac{d_g \cos \phi}{d_l} \right) \right) \quad [Hz] \quad [2] \quad (1.25)$$

$$BSF = S \left(\frac{d_l}{2d_g} \left(1 - \frac{d_g^2 \cos^2 \phi}{d_l^2} \right) \right) \quad [Hz] \quad [2] \quad (1.26)$$

1.5 Prevodovky a ich poruchy

Prevodovky sú vlastne sústavou cylindrických kolies používaných na prenos mechanickej sily z jedného hriadeľa na druhý. V praxi sa používa nespočetné množstvo prevodoviek, nás však budú zaujímať dva konkrétne druhy a to ozubené prevodovky a planetové prevodovky. Ozubené prevodovky rozumieme ako klasický prevod dvoch ozubených kolies, jedno je riadiace a druhé riadené, viď. Obr. 1.12.

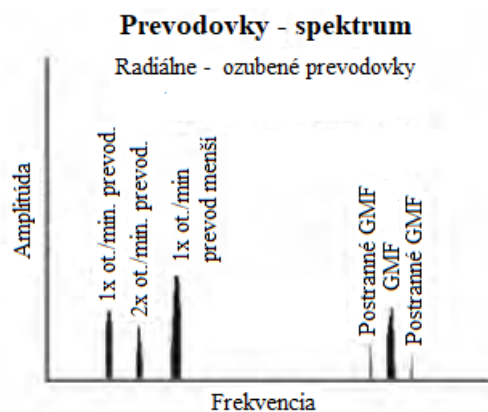
Planetové prevodovky sa skladajú z viacerých častí. Sú to centrálné koleso, korunové koleso a satelitné kolesá. Satelitné kolesá majú vlastný unášací hriadeľ a sú v zábere s centrálnym a korunovým kolesom, viď. Obr. 1.12.



Obr. 1.12: Príklady v praxi používaných prevodoviek (naľavo - ozubený prevod; napravo - planetová prevodovka) [5]

Pri normálnej prevádzke vykazuje FFT spektrum prevodovky nízkofrekvenčné a harmonické, ale môže vykazovať aj vysokú aktivitu vo vysokofrekvenčnom spektre spôsobené vzájemnými nárazmi zubov prevodovky a dorazmi ložísk, viď 1.13. Z toho vyplýva, že spektrum každej prevodovky vykazuje základnú a dvojnásobnú frekvenciu otáčok prevodovky súčasne s GMF (z ang. *Gear Mesh Frequency* - *frekvencia stretávania sa zubov*). Vzťah pre GMF je [1]:

$$GMF = N_G * \omega_G [1] \quad (1.27)$$



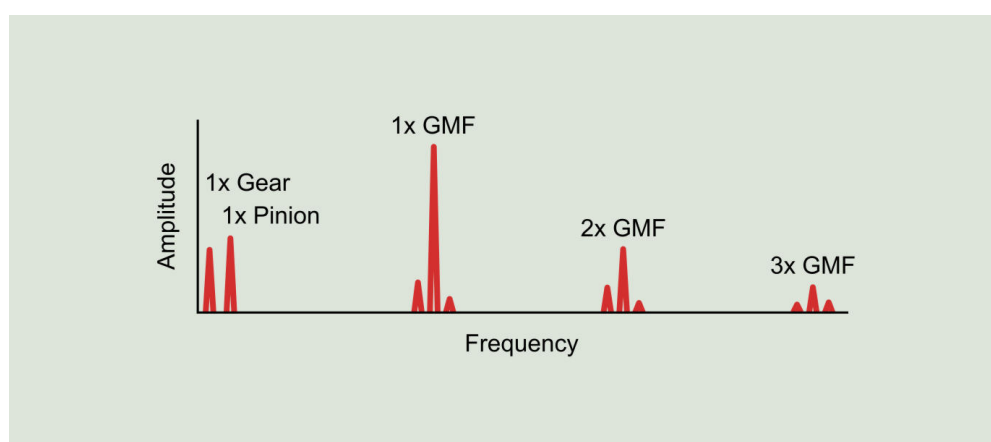
Obr. 1.13: FFT spektrum prevodovky za normálneho chodu [1]

N_G je v tomto prípade počet zubov ozubení prevodovky, a ω_G je rýchlosť otáčania ozubeného kolesa.

1.5.1 Ozubené prevodovky

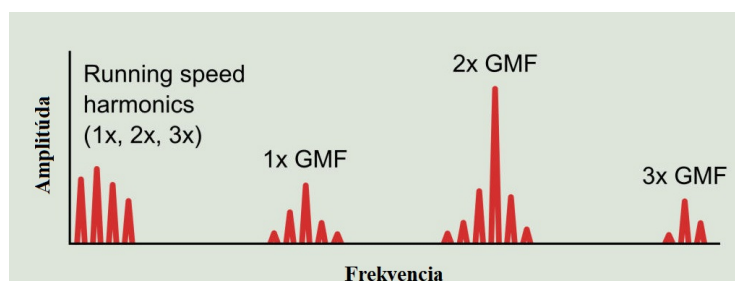
Ozubenými prevodovkami v našom prípade myslíme spriahnutie dvoch ozubených kolies s rozdielnym počtom zubov do spoločného prevodu. Pri tomto type môže nastať široká škála porúch, napr. voľnosť a opotrebenie ozubených kolies, nezarovanie, poškodenie zubov prevodu a zataženie zubov.

Pri analýze môže nastať zaujímavá porucha prevodovky, a to zataženie zubov prevodovky. V prípade zataženia zubov prevodovky sa pri jeho zvyšovaní na prevodovke bude zvyšovať aj amplitúda GMF, viď. Obr. 1.14. To však nemusí znamenať výskyt tohto problému, pokiaľ však budú postranné frekvencie GMF s rovnakou amplitúdou ako pri nezatažení a nie sú vydávané žiadne prirodzené frekvencie prevodovky. [1].



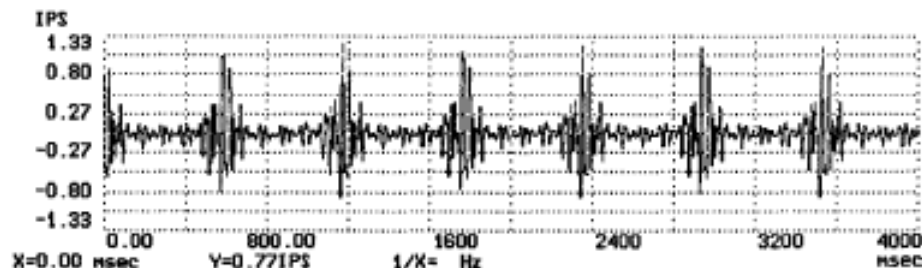
Obr. 1.14: Spektrálna analýza prevodovky pri zatažení zubov [14]

Nezarovnanie ozubených kolies generuje špecifické spektrum. Ak sú prvé tri harmonické nezvyčajné, znamená to nezarovnanie. Tieto tri harmonické môžu nadobúdať rôzne formy, ale zvyčajne základná GMF frekvencia má najväčšiu amplitúdu, a jej nasledujúce dve násobky sú nižšie, viď. 1.15 [2].



Obr. 1.15: FFT analýza nezarovnania pri prevodovke [14]

Poškodenie ozubených kolies generuje tlmený impulz, viď. Obr. 1.16, ktorý je vygenerovaný vstupom do drážky k poškodenému zubu. Ďalší v poradí nepoškodený zub prevodovky utlmí tento impulz. Z toho vyplýva, že šírka impulzu je zvyčajne len polovica jedného cyklu prechodu medzi zubami prevodovky. Tento impulz má štyri rôzne merateľné charakteristické znaky, a to frekvenciu impulzu, šírku impulzu, rýchlosť opakovania a amplitúdu impulzu.



Obr. 1.16: Časový priebeh poškodenia zubu prevodu [2]

1.5.2 Planetové prevodovky

Planetová prevodovka má v základe štyri rôzne rýchlosti, a to rýchlosť centrálného kolesa S_s , rýchlosť satelitných kolies S_p , rýchlosť korunového kolesa S_r a rýchlosť unášacieho hriadeľa S_c . Rýchlosť S_r je konštatne nulová, pretože sa počas prevádzky korunové koleso nepohybuje. [2].

Rýchlosť v smere hodinových ručičiek bude označená kladne (+) a proti smeru hodinových ručičiek bude označená záporne (-). Rýchlosti a smer dvoch rýchlostí musí nám byť známe, aby sme mohli vypočítať veľkosť ďalších dvoch rýchlostí. Takisto musí byť aj známy počet zubov každej z častí prevodovky. Napríklad, ak poznáme rýchlosť otáčania centrálného koles S_s a rýchlosť korunového kolesa S_r tak vieme dopočítať rýchlosť satelitných kolies S_p a rýchlosť unášacieho hriadeľa S_c [2].

Z literatúry sme vybrali nasledujúce vzťahy, ktoré slúžia pre určenie už spomenutých rýchlostí a GMF pre stretávanie sa zubov centrálné/planéty $GM_{s/p}$ a planéty/koruna $GM_{p/r}$.

$$S_s = S_r \left(\frac{N_r}{N_s} \right) + S_c \left(1 - \frac{N_r}{N_s} \right) \quad [ot./s] \quad [2] \quad (1.28)$$

$$S_c = \frac{S_r \left(\frac{N_r}{N_s} \right) - S_s}{\left(\frac{N_r}{N_s} \right) - 1} \quad [ot./s] \quad [2] \quad (1.29)$$

$$S_r = S_s \left(\frac{N_s}{N_r} \right) + S_c \left(1 - \frac{N_s}{N_r} \right) \quad [ot./s] \quad [2] \quad (1.30)$$

$$S_p = S_r \left(\frac{N_r}{N_p} \right) + S_c \left(1 - \frac{N_r}{N_p} \right) \quad [ot./s] \quad [2] \quad (1.31)$$

$$GM_{s/p} = |(S_s - S_c)|N_s \quad [Hz] \quad [2] \quad (1.32)$$

$$GM_{s/p} = |(S_p - S_c)|N_p \quad [Hz] \quad [2] \quad (1.33)$$

$$GM_{p/r} = |(S_r - S_c)|N_r \quad [Hz] \quad [2] \quad (1.34)$$

Poruchová frekvencia pre chybu na korunovom kolese sa vypočíta nasledovne, pričom N_p je počet satelitných kolies:

$$F_r = N_p S_c \quad [Hz] \quad [11] \quad (1.35)$$

Poruchová frekvencia pre chybu na centrálnom kolese sa vypočíta nasledovne:

$$F_s = N_p S_s - S_p \quad [Hz] \quad [11] \quad (1.36)$$

Poruchová frekvencia pre chybu na satelitnom kolese sa vypočíta nasledovne:

$$F_p = 2S_p \quad [Hz] \quad [11] \quad (1.37)$$

1.6 Simulátory dostupné na trhu

Softvér, ktorý je dostupný širokej verejnosti môžeme rozdeliť na dve skupiny. Prvou je skupina CAD softvéru pre strojnicky priemysel, z ktorej najvhodnejší zástupcovia sú *SolidWorks* a *Autodesk Inventor*, pretože s nimi máme náležité skúsenosti. Analýzu namáhania pri širokom spektre frekvencií poskytujú obidve programy, avšak frekvenčnú analýzu vibrácií pri simulácii poskytuje len *SolidWorks*. Navyše umožňuje túto analýzu vykonať na rôznych pozíciách na mechanickej sústave, čo je jeho veľkou výhodou.

Zástupcom druhej skupiny je softvér *Gears Program*, spomenutý v zdroji *The Vibration Analysis Handbook*. [2] Tento softvér môže byť použitý na počítanie rôznych frekvencií prevodoviek, pričom je takýto výpočet veľmi efektívny. Jedinými požadovanými vstupmi sú počet zubov každého z dvoch ozubených kolies, rýchlosť jedného z nich a frekvencia stretávania sa zubov, tj. GMF. Pomocou týchto štyroch vstupných parametrov je určených ďalších osem. [2]

2 Teoretický rozbor návrhu simulátora

Pre splnenie zadaného cieľa sa musíme zamyslieť na potrebami pre tento simulátor, a vhodne ho aj teoreticky navrhnuť tak, aby spĺňal kladené požiadavky a tak bol po jeho realizácii aj efektívne využiteľný a poskytoval hodnoverné údaje. V nasledujúcich bodoch rozoberieme požiadavky, ktoré budú kladené pre každú zo simulovaných mechanických súčastí a taktiež požiadavky špeciálne pre každú súčasť samostatne. Navrhujeme aj použitie určitých vlastností prostredia LabVIEW, ktoré budú použité a tak bude výsledok hodnovernejší.

2.1 Spoločné požiadavky všetkých mechanických súčastí

Najdôležitejším parametrom pri simulácii rotačných súčastí je nastavenie otáčok v pracovnom okne každej súčasti. Pracovné okno bude v rozsahu 0 - 3000 ot./min. pre každú zo súčastí. Rozsah otáčok, pri ktorom sa prejavujú jednotlivé poruchy je iný pre každú súčasť. Pre každú súčasť a každú poruchu bude implementované samostatné VI.

Simulácia bude poskytovať dve základné výstupy, a to sledovanie časového priebehu signálu vibrácií a tiež sledovanie spektra signálu vibrácií. Sledovanie týmito dvoma spôsobmi má svoj dôvod. Tým je, že pri sledovaní časového priebehu pri vyšších otáčkach nie je možné rozpoznať poruchu na mechanickej súčasti. Sledovanie spektra vibračného signálu tento problém obchádza, pretože zložky signálu, ktorými sa porucha prejavuje budú rovnaké pre rôzne otáčky, meniť sa budú len násobky frekvencie, ktorými sa porucha prejaví.

Ak by boli vibrácie merané v realite a výsledok by bol len zobrazený pomocou výpočtovej techniky, tak by meraný signál nikdy nebol ideálny, tj. len požadovaný užitočný signál. Meraný signál bude obsahovať aj šum, ktorý môže byť z rôznych zdrojov, napr. iné zdroje vibrácií (použitý pohon, ďalšie súčasti na ktorých sa práve neuskutočňuje meranie, ...), šumové vlastnosti použitých snímačov, prevodníkov a podobne.

Tieto šumové vlastnosti budú simulované pomocou Generátoru Bieleho šumu (z ang. *Gaussian White Noise*), ktorý je súčasťou ponuky Express -> Input -> Simulate Signal Express VI. Toto VI poskytuje ľahkú konfigurateľnosť, pričom zdroj signálu je možné spojiť so šumovým signálom a to bez potreby ďalších VI [8]. Vo väčšine prípadov návrhu budú využívané vstupy pre veľkosť amplitúdy a frekvencie. Výstup bude použitý len jeden, a to signálový výstup.

Vibrácie sa v praxi na mechanických súčiastiach merajú v radiálnom aj axiálnom smere. Je to preto, aby sme zabezpečili to, že budeme merať užitočný signál. To sa dá rozpoznať podľa toho, ktorý zo signálov bude mať väčšiu amplitúdu. Jednou z požiadavok na simulátor je aby simuloval priamo užitočný signál.

2.2 Požiadavky pre hriadeľ

Pri nevyvážení je potrebné užívateľovi poskytnúť možnosť zvolenia medzi popísanými druhmi nevyváženia, každé z nich sa prejavuje inak. Pre každý druh nevyváženia bude vytvorené samostatné VI. Ďalšou požadovanou poruchou je ohnutie hriadeľa. Pri tejto poruche si musíme zvoliť aj miesto ohnutia, tj. buď v strede alebo pri kraji. Takisto pre každý miesto ohnutia bude vytvorené samostatné VI. Táto zmena zásadne ovplyvňuje výstupný signál, a tým pádom pomáha aj k presnejšej lokalizácii poruchy. Poslednou simulovanou poruchou pri hriadeľi bude nezarovnanie. Simulované budú dva druhy nezarovnania, a to spomínané paralelné a uhlové nezarovnanie. Prejav uhlového nezarovnania obsahuje väčšinou tri harmonické základnej frekvencie, minimálne to však musia byť dve. Paralelné nezarovnanie sa bude prejavovať frekvenciou úmernou dvojnásobku frekvencie otáčania súčasti. Taktiež pre každý druh nezarovnania bude vytvorené samostatné VI.

2.3 Požiadavky pre ložiská

Pre ložiská s valivými telieskami budú vytvorené samostatné VI pre každý popísaný druh poruchy. Užívateľ bude mať možnosť nastavenia rozmerov teliesok tohto valivého ložiska. Simulované poruchy budú pre všetky spomenuté poruchy z kapitoly 1, tj. poškodenie kletky ložiska FTF, chyba vonkajšej drážky pre valivé teleso BPFO, chyba vnútornej drážky pre valivé teleso BPFI a chyba na valivom teliesku BSF.

2.4 Požiadavky pre prevodovky

Budú vytvorené samostatné VI pre obe simulované druhy prevodoviek, tj. ozubené prevodovky a planetová prevodovka simulovanie poškodenia ozubení, nezarovnanie ozubených kolies prevodovky a opotrebenie alebo nedostatočnú priliehavosť ozubených kolies. Pri planetovej prevodovke zvlášť poškodenie ozubení pre každú z častí, tj. centrálné koleso, korunové koleso a satelitné kolesá.

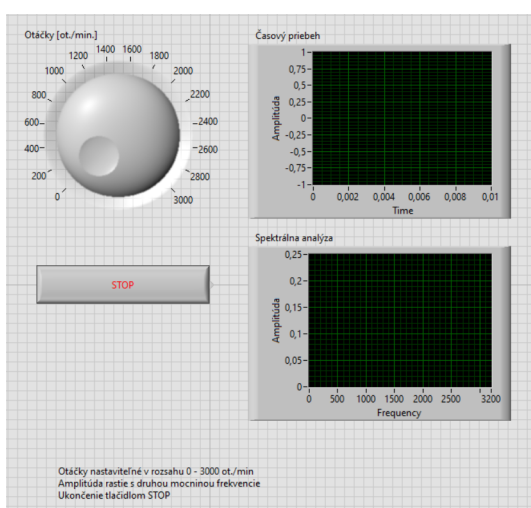
3 Návrh simulátora v LabVIEW

3.1 Programové riešenie pre nevyváhu hriadele

V nasledujúcich odsekoch bude rozobraný návrh nevyváhy hriadele.

3.1.1 Statické nevyváženie

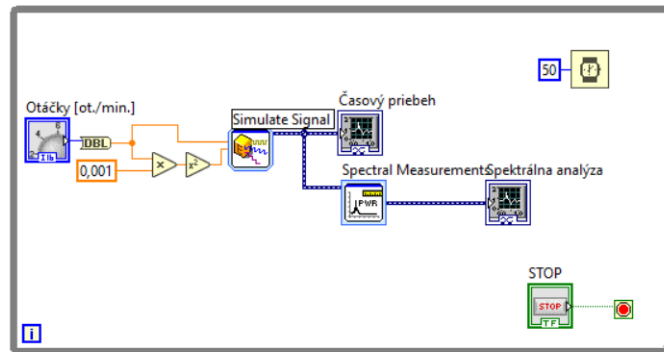
Predný panel *Staticke_nevyvazenie.vi* je uvedený na Obr. 3.1. Nachádza sa na ňom mechanizmus pre nastavenie otáčok v pracovnom okne, tlačidlo STOP pre zastavenie behu programu inštrukcie pre korektné používanie programu a dve grafy: jeden pre časový priebeh výstupného signálu a druhý pre spektrálnu analýzu výstupného signálu.



Obr. 3.1: Predný panel VI pre analýzu statického nevyváženia

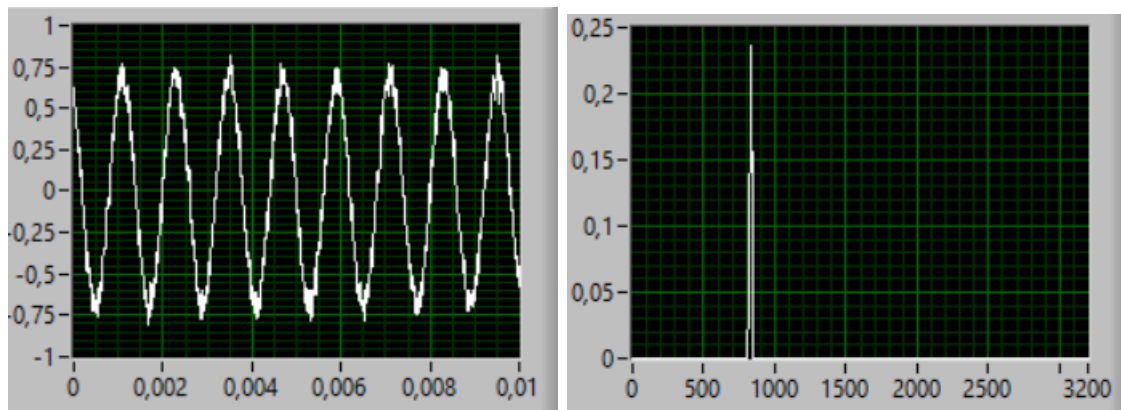
Pri návrhu sa riadime teoretickým úvodom v odseku 1.3.1 a spektrálnou analýzou, viď. Obr. 1.2. Blokový diagram *Staticke_nevyvazenie.vi* je uvedený na Obr. 3.2. Princíp funkcie programu je jednoduchý. Celý program beží v cykle *While*, a jeho beh je možné zastaviť len pomocou tlačidla STOP. Po nastavení otáčok na prednom paneli sa nastavená hodnota skonvertuje z celočíselného dátového typu *integer (I16)* na dátový typ *double*. Konverzia sa deje z dôvodu lepšieho nastavovania otáčok na prednom paneli, keďže na ňom pracujeme s celočíselnými hodnotami. Tento signál je následne privádzaný na vstup *Simulate Signal Express VI*, pričom na vstupe nastavíme jeho dve parametre. Prvým z nich je amplitúda ktorá sa zvyšuje s druhou mocninou rýchlosti, resp. otáčok. Druhým vstupom je nastavovanie frekvencie, ktoré je priamo úmerné otáčkám. Interne bol v samotnom zdroji signálu nastavený šum,

ktorý má za úlohu výstup simulácie priblížiť viac k reálne nameraným hodnotám. Zo signálneho výstupu potom zobrazujeme časový priebeh a výstup spektrálnej analýzy. Spektrálna analýza je zostrojená z časového priebehu výstupného signálu a je spracovaná pomocou *Spectral Measurements Express VI*, kde nastavíme *Power Spectrum* a lineárnu mierku. Po každej iterácii cyklu programu čakáme pomocou bloku *Wait* 50 milisekúnd. Týmto spôsobom odľahčíme procesor bez toho, aby si užívateľ všimol zmenu v behu programu.



Obr. 3.2: Predný panel VI pre analýzu statického nevyváženia

Časový priebeh a spektrálna analýza signálu statického nevyváženia je uvedená na Obr. 3.3.

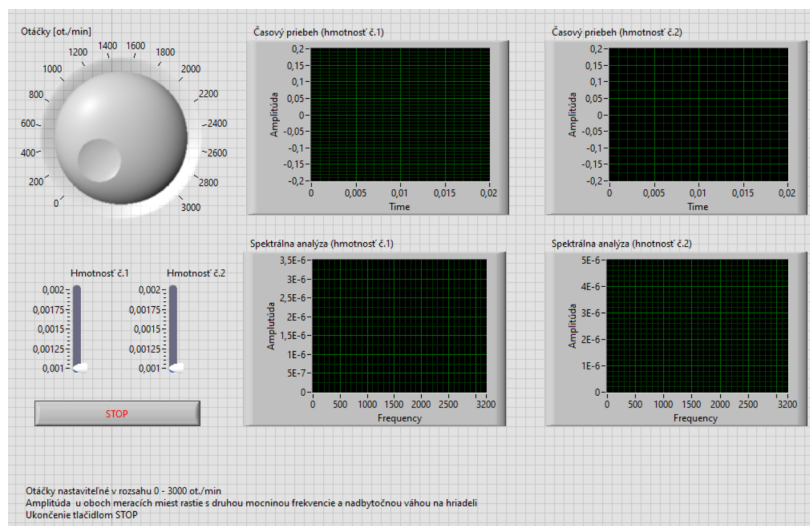


Obr. 3.3: Časový priebeh a spektrálna analýza signálu statického nevyváženia

3.1.2 Párové nevyváženie

Predný panel *Parove_nevyvazenie.vi*, uvedený na Obr.3.4, je v niečom rozdielny oproti prednému panelu pre statické nevyváženie. Nachádza sa na ňom mechaniz-

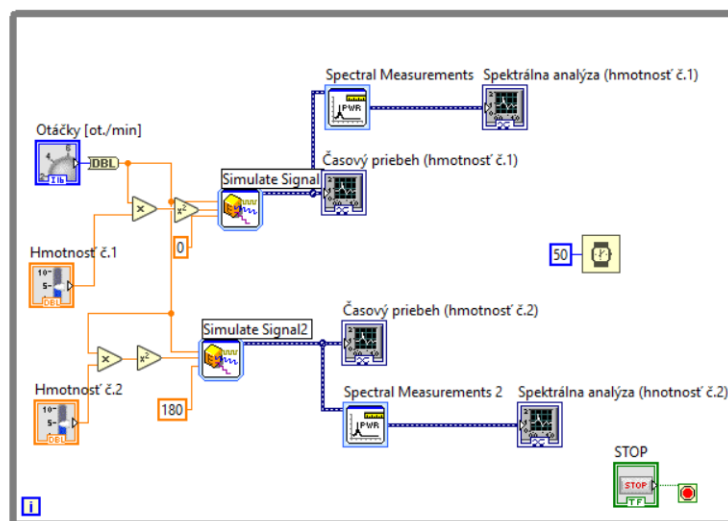
mus pre nastavenie otáčok v pracovnom okne, tlačidlo STOP pre zastavenie behu programu, nastavovanie veľkosti dvoch hmotností na hriadelí (náhrada konštanty pri statickom nevyvážení), inštrukcie pre korektné používanie programu a štyri grafy: dve pre časový priebeh výstupného signálu a druhé dve pre spektrálnu analýzu výstupného signálu. Každá hmotnosť má tak vlastný časový priebeh a aj spektrálnu analýzu.



Obr. 3.4: Predný panel VI pre analýzu párového nevyváženia

Pri návrhu sa riadime teoretickým úvodom v odseku 1.3.1 a spektrálnou analýzou, vid. Obr. 1.2 a už realizovaným návrhom pre statické nevyváženie. Blokový diagram *Parove_nevyvazenie.vi* je uvedený na Obr. 3.5. Princíp funkcie programu je jednoduchý. Celý program beží v cykle *While*, a jeho beh je možné zastaviť len pomocou tlačidla STOP. Po nastavení otáčok na prednom paneli sa nastavená hodnota skonvertuje z celočíselného dátového typu *integer* (*I16*) na dátový typ *double*. Konverzia sa deje z dôvodu lepšieho nastavovania otáčok na prednom paneli, keďže na ňom pracujeme s celočíselnými hodnotami. Na vstupe dvoch *Simulate Signal Express VI* tentokrát nastavujeme tri parametre. Okrem už dvoch spomínaných parametrov, a to amplitúda a frekvencia nastavujeme aj tretí parameter, fázový posun signálu. Tieto signály sú vzájomne posunuté o 180 stupňov, aby tak definícia párového nevyváženia odpovedala odseku 1.3.1. Taktiež bol opäť interne v oboch zdrojoch signálu nastavený šum, pre väčšiu dôveryhodnosť výstupu. Z výstupov týchto zdrojov sme opäť zobrazovali časové priebehy a spektrálne analýzy spracované pomocou *Spectral Measurements Express VI* s rovnakým nastavením ako pri statickom nevyvážení. Takisto opäť čakáme po každej iterácii cyklu programu 50 milisekúnd. Výstupný časový priebeh a spektrálna analýza jedného z kanálov je rovnaká, ako pri statickom

nevyvážení, vid. Obr. 3.3.

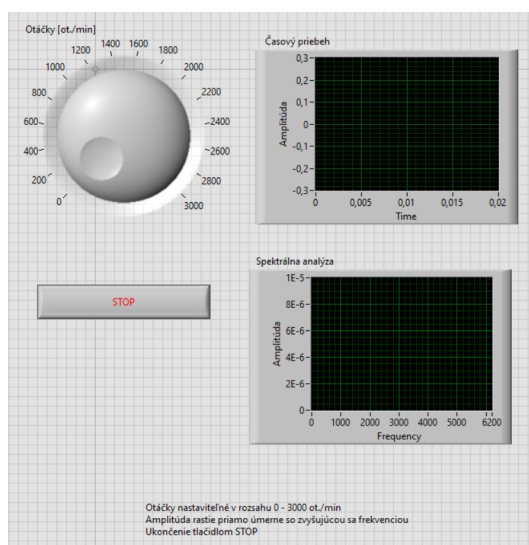


Obr. 3.5: Blokový diagram VI pre analýzu párového nevyváženia

3.2 Programové riešenie pre ohnutie hriadeľa

V nasledujúcich odsekoch bude rozobraný návrh nevyváhy hriadele.

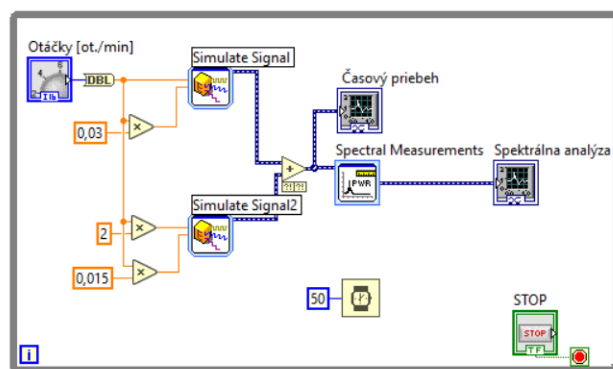
3.2.1 Ohnutie hriadele v strede



Obr. 3.6: Predný panel VI pre analýzu ohnutej hriadele v strede

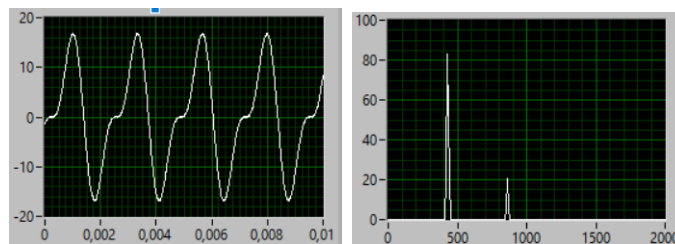
Predný panel *Ohnuta_hriadel_stred.vi*, uvedený na Obr.3.6, je podobný s predným panelom statického nevyváženia. Nachádza sa na ňom mechanizmus pre nastavenie otáčok v pracovnom okne, tlačidlo STOP pre zastavenie behu programu inštrukcie pre korektné používanie programu a dve grafy: jeden pre časový priebeh výstupného signálu a druhý pre spektrálnu analýzu výstupného signálu.

Pri návrhu sa riadime teoretickým rozborom v odseku 1.3.2 a spektrálnou analýzou na Obr. 1.4. Blokový diagram *Ohnuta_hriadel_stred.vi* je uvedený na Obr. 3.7. Princíp funkcie programu je nasledovný. Celý program beží v cykle *While*, a jeho beh je možné zastaviť len pomocou tlačidla STOP. Po nastavení otáčok na prednom paneli sa nastavená hodnota skonvertuje z celočíselného dátového typu *integer* (I16) na dátový typ *double*. Konverzia sa deje z dôvodu lepšieho nastavovania otáčok na prednom paneli, keďže na ňom pracujeme s celočíselnými hodnotami. Na vstupe dvoch *Simulate Signal Express VI* nastavujeme dva parametre, a to amplitúdu signálu a jeho frekvenciu. Pri prvom zdroji je amplitúda po násobení konštantou úmerná otáčkam, a frekvencia je tiež úmerná otáčkam. Pri druhom zdroji je však konštanta násobenia polovičná oproti prvému zdroju, a frekvencia je dvojnásobok otáčok. Týmto zabezpečíme to, že na výstupe bude signál hriadele ohnutej v strede, podľa definície v odseku 1.3.2. Taktiež bol opäť interne v oboch zdrojoch signálu nastavený šum, pre väčšiu dôveryhodnosť výstupu. Z výstupov týchto zdrojov sme opäť zobrazovali časový priebeh a spektrálnu analýzu spracovanú pomocou *Spectral Measurements Express VI* opäť s rovnakým nastavením ako v predchádzajúcich prípadoch. Takisto opäť čakáme po každej iterácii cyklu programu 50 milisekúnd.



Obr. 3.7: Predný panel VI pre analýzu ohnutej hriadele v strede

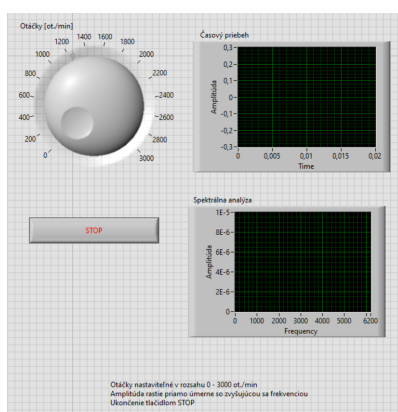
Časový priebeh a spektrálna analýza signálu hriadele ohnutej v strede je uvedená na Obr. 3.8



Obr. 3.8: Časový priebeh a spektrálna analýza signálu ohnutej hriadele v strede

3.2.2 Ohnutie hriadele na kraji

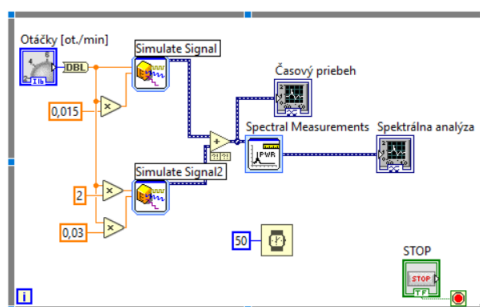
Predný panel *Ohnuta_hriadel_kraj.vi*, uvedený na Obr.3.9, je totožný s predným panelom ohnutia hriadele v strede, resp. statického nevyváženia. Nachádza sa na ňom mechanizmus pre nastavenie otáčok v pracovnom okne, tlačidlo STOP pre zastavenie behu programu inštrukcie pre korektné používanie programu a dve grafy: jeden pre časový priebeh výstupného signálu a druhý pre spektrálnu analýzu výstupného signálu.



Obr. 3.9: Predný panel VI pre analýzu ohnutej hriadele na kraji

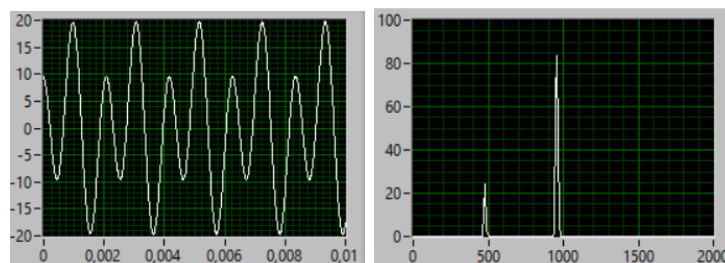
Pri návrhu sa riadime teoretickým rozborom v odseku 1.3.2. Blokový diagram *Ohnuta_hriadel_kraj.vi* je uvedený na Obr. 3.10. Princíp funkcie programu je nasledovný. Celý program beží v cykle *While*, a jeho beh je možné zastaviť len pomocou tlačidla STOP. Po nastavení otáčok na prednom paneli sa nastavená hodnota konvertuje z celočíselného dátového typu *integer* (*I16*) na dátový typ *double*. Konverzia sa deje z dôvodu lepšieho nastavovania otáčok na prednom paneli, keďže na ňom pracujeme s celočíselnými hodnotami. Na vstupe dvoch *Simulate Signal Express VI* nastavujeme dva parametre, a to amplitúdu signálu a jeho frekvenciu. Pri prvom zdroji je amplitúda po násobení konštantou úmerná otáčkam, a frekvencia je tiež

úmemrná otáčkam. Pri druhom zdroji je však konštanta násobenia dvojnásobná oproti prvému zdroju, a frekvencia je dvojnásobok otáčok. Týmto zabezpečíme to, že na výstupe bude signál hriadele ohnutej na kraji, podľa definície v odseku 1.3.2. Taktiež bol opäť interne v oboch zdrojoch signálu nastavený šum, pre väčšiu dôveryhodnosť výstupu. Z výstupov týchto zdrojov sme opäť zobrazovali časový priebeh a spektrálnu analýzu spracovanú pomocou *Spectral Measurements Express VI* opäť s rovnakým nastavením ako v predchádzajúcich prípadoch. Takisto opäť čakáme po každej iterácii cyklu programu 50 milisekúnd.



Obr. 3.10: Predný panel VI pre analýzu ohnutej hriadele na kraji

Časový priebeh a spektrálna analýza signálu hriadele ohnutej na kraji je uvedená na Obr. 3.11.



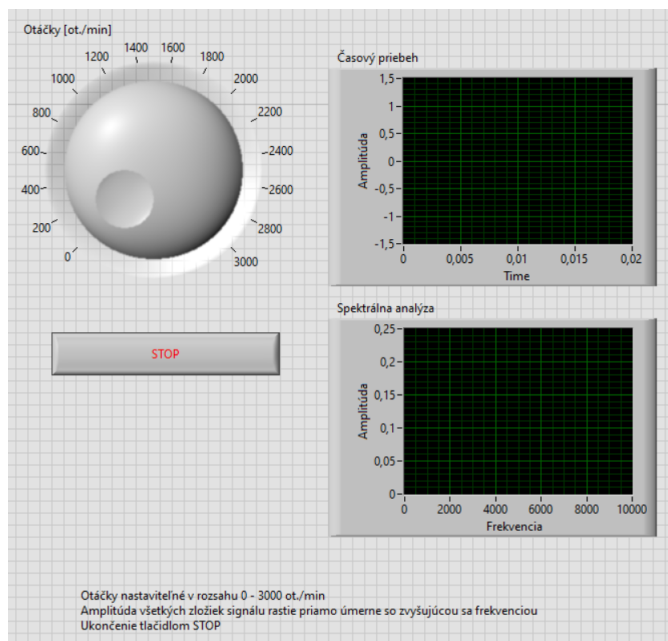
Obr. 3.11: Časový priebeh a spektrálna analýza signálu ohnutej hriadele na kraji

3.3 Programové riešenie pre nezarovnanie mechanických súčastí

V nasledujúcich odsekoch bude rozobraný návrh porúch valivých ložísk.

3.3.1 Uhlové nezarovnanie

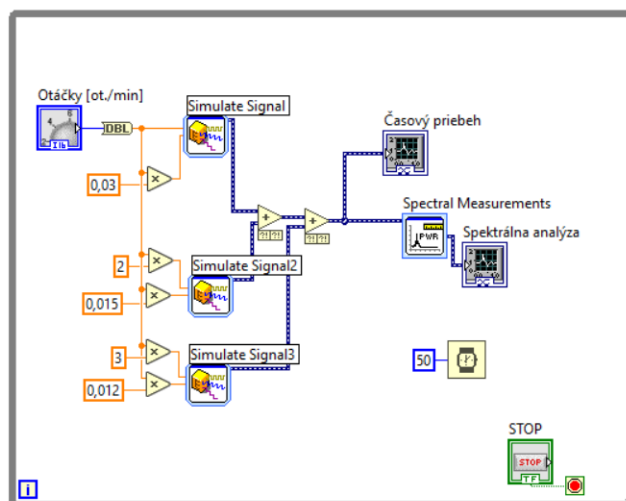
Predný panel *Uhlove_nezarovnanie.vi*, uvedený na Obr.3.12, je totožný s predným panelom ohnutia hriadele v strede, resp. statického nevyváženia. Nachádza sa na ňom mechanizmus pre nastavenie otáčok v pracovnom okne, tlačidlo STOP pre zastavenie behu programu inštrukcie pre korektné používanie programu a dve grafy: jeden pre časový priebeh výstupného signálu a druhý pre spektrálnu analýzu výstupného signálu.



Obr. 3.12: Predný panel VI pre analýzu uhlového nezarovnaní

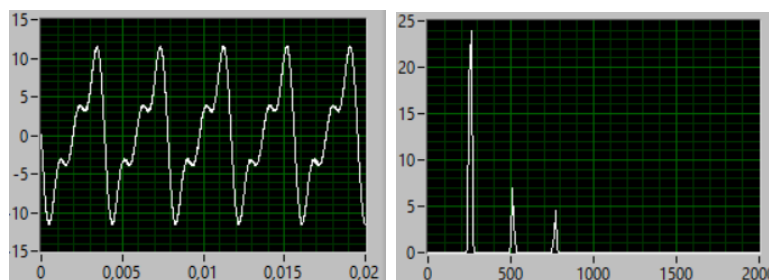
Pri návrhu je smerodajný teoretický rozbor v odseku 1.3.3. Blokový diagram *Uhlove_nezarovnanie.vi* je uvedený na Obr. 3.13. Princíp funkcie programu je nasledovný. Celý program beží v cykle *While*, a jeho beh je možné zastaviť len pomocou tlačidla STOP. Po nastavení otáčok na prednom paneli sa nastavená hodnota konvertuje z celočíselného dátového typu *integer (I16)* na dátový typ *double*. Konverzia sa deje z dôvodu lepšieho nastavovania otáčok na prednom paneli, keďže sa lepšie pracuje s celočíselnými hodnotami. Na vstupe troch *Simulate Signal Express VI* sú nastavené dva parametre, a to amplitúda signálu a jeho frekvencia. Pri prvom zdroji je amplitúda po násobení konštantou úmerná otáčkam, a frekvencia je tiež úmerná otáčkam. Pri druhom zdroji je však konštanta násobenia polovičná oproti prvému zdroju, a frekvencia je dvojnásobok otáčok. Pri treťom zdroji je však konštanta násobenia menšia o jednu pätinu oproti druhému zdroju, a frekvencia otáčok je oproti prvému zdroju väčšia trojnásobne. Týmto je zabezpečené, že na výstupe bude signál

uhlového nezarovnanie mechanických súčastí, podľa definície v odseku 1.3.3. Taktiež bol opäť interne vo všetkých troch zdrojoch signálu nastavený šum, pre väčšiu dôveryhodnosť výstupu. Z výstupov týchto zdrojov sa ich sčítaním urobil jeden signál, ten opäť zobrazoval časový priebeh a spektrálnu analýzu spracovanú pomocou *Spectral Measurements Express VI* opäť s rovnakým nastavením ako v predchádzajúcich prípadoch. Takisto sa čaká po každej iterácii cyklu programu 50 milisekúnd.



Obr. 3.13: Predný panel VI pre analýzu uhlového nezarovnanie

Časový priebeh a spektrálna analýza uhlového nezarovnanie mechanickej súčasti je uvedená na Obr. 3.14.

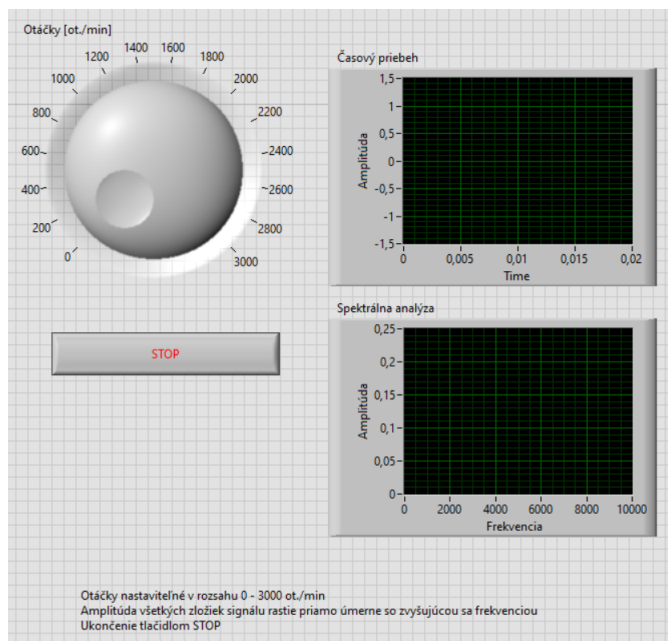


Obr. 3.14: Časový priebeh a spektrálna analýza signálu uhlového nezarovnanie

3.3.2 Paralelné nezarovnanie

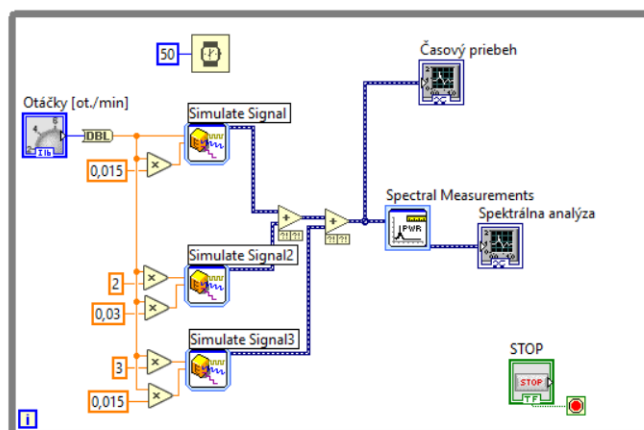
Predný panel *Paralelne_nezarovnanie.vi*, uvedený na Obr.3.15, je totožný s predným panelom uhlového nezarovnanie. Nachádza sa na ňom mechanizmus pre nastavenie otáčok v pracovnom okne, tlačidlo STOP pre zastavenie behu programu inštrukcie

pre korektné používanie programu a dve grafy: jeden pre časový priebeh výstupného signálu a druhý pre spektrálnu analýzu výstupného signálu.



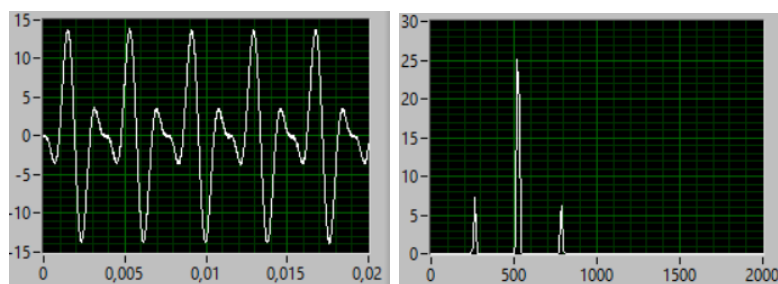
Obr. 3.15: Predný panel VI pre analýzu paralelného nezarovnania

Pri návrhu je smerodajný teoretický rozbor v odseku 1.3.3. Blokový diagram *Uhlove_nezarovnanie.vi* je uvedený na Obr. 3.16. Princíp funkcie programu je nasledovný. Celý program beží v cykle *While*, a jeho beh je možné zastaviť len pomocou tlačidla STOP. Po nastavení otáčok na prednom paneli sa nastavená hodnota konvertuje z celočíselného dátového typu *integer (I16)* na dátový typ *double*. Konverzia sa deje z dôvodu lepšieho nastavovania otáčok na prednom paneli, keďže sa lepšie pracuje s celočíselnými hodnotami. Na vstupe troch *Simulate Signal Express VI* sú nastavené dva parametre, a to amplitúda signálu a jeho frekvencia. Pri prvom zdroji je amplitúda po násobení konštantou úmerná otáčkam, a frekvencia je tiež úmerná otáčkam. Pri druhom zdroji je však konštanta násobenia dvojnásobná oproti prvému zdroju, a frekvencia je dvojnásobok otáčok. Pri treťom zdroji je však konštanta násobenia opäť ako pri prvom zdroji, a frekvencia otáčok je oproti prvému zdroju väčšia trojnásobne. Týmto je zabezpečené, že na výstupe bude signál paralelného nezarovnania mechanických súčastí, podľa definície v odseku 1.3.3. Taktiež bol opäť interne vo všetkých troch zdrojoch signálu nastavený šum, pre väčšiu dôveryhodnosť výstupu. Z výstupov týchto zdrojov sa ich sčítaním urobil jeden signál, ten opäť zobrazoval časový priebeh a spektrálnu analýzu spracovanú pomocou *Spectral Measurements Express VI* opäť s rovnakým nastavením ako v predchádzajúcich prípadoch. Takisto sa čaká po každej iterácii cyklu programu 50 milisekúnd.



Obr. 3.16: Predný panel VI pre analýzu uhlového nezarovnaní

Časový priebeh a spektrálna analýza paralelného nezarovnaní mechanickej súčasti je uvedená na Obr. 3.17.



Obr. 3.17: Časový priebeh a spektrálna analýza signálu paralelného nezarovnaní

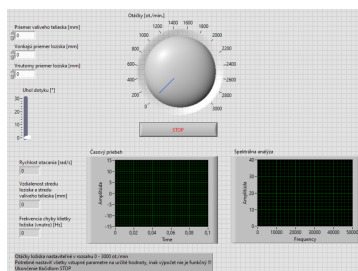
3.4 Programové riešenie pre valivé ložiská

V nasledujúcich odsekoch bude rozobraný návrh porúch valivých ložísk.

3.4.1 FTF - frekvencia odpovedajúca chybe kletky ložiska - vnútro

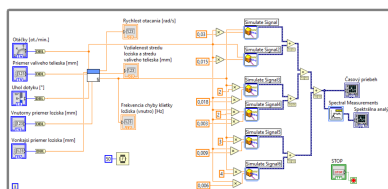
Predný panel *FTF_lozisko_vnutro.vi*, uvedený na Obr.3.18, je totožný s predným panelom uhlového nezarovnaní. Nachádza sa na ňom mechanizmus pre nastavenie otáčok v pracovnom okne, mechanizmus pre nastavenie priemeru valivého telieska, vonkajšieho a vnútorného priemeru ložiska, uhlu dotyku valivých teliesok, tlačidlo STOP pre zastavenie behu programu inštrukcie pre korektné používanie programu

a dve grafy: jeden pre časový priebeh výstupného signálu a druhý pre spektrálnu analýzu výstupného signálu.



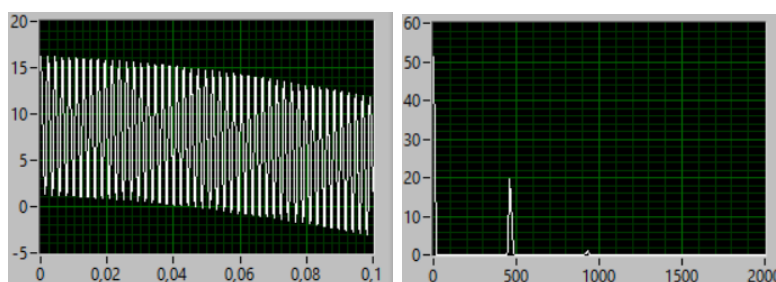
Obr. 3.18: Predný panel VI pre FTF analýzu - vnútro

Pri návrhu je smerodiatný teoretický rozbor v odseku 1.4 a spektrálna analýza na Obr. 1.8. Blokový diagram *FTF_lozisko_vnutro.vi* je uvedený na Obr. 3.19. Princíp funkcie programu je nasledovný. Celý program beží v cykle *While*, a jeho beh je možné zastaviť len pomocou tlačidla STOP. Po nastavení všetkých potrebných parametrov na prednom paneli sa tieto parametre skonvertujú z celočíselného dátového typu *integer* (*I16*) na dátový typ *double*. Konverzia sa deje z dôvodu lepšieho nastavovania otáčok na prednom paneli, keďže sa lepšie pracuje s celočíselnými hodnotami. Tieto vstupy sú následne pripojené do *FTF_vnutro_vypocet(SubVI).vi*, kde sa vypočíta FTF frekvencia pre vnútorné poškodenie, vzdialenosť stredu ložiska a stredu valivého ložiska a rýchlosť otáčania. Pre ďalšie výpočty sú však potrebné len FTF frekvencia a otáčky ložiska. Následne na vstupoch šiestich *Simulate Signal Express VI* sú nastavené dva parametre, a to amplitúda signálu a jeho frekvencia. Pri všetkých zdrojoch je amplitúda po násobení konštantami podľa veľkosti spektrálnych zložiek na obrázku 1.8 priamo úmerná otáčkam, frekvencia je úmerná FTF frekvencii s jej jednotlivými násobkami podľa obrázku 1.8. Opäť bol interne vo všetkých troch zdrojoch signálu nastavený šum, pre väčšiu dôveryhodnosť výstupu. Z výstupov týchto zdrojov sa ich sčítaním urobil jeden signál, ten opäť zobrazoval časový priebeh a spektrálnu analýzu spracovanú pomocou *Spectral Measurements Express VI* opäť s rovnakým nastavením ako v predchádzajúcich prípadoch. Takisto sa čaká po každej iterácii cyklu programu 50 milisekúnd.



Obr. 3.19: Blokový diagram pre FTF analýzu - vnútro

Časový priebeh a spektrálna analýza FTF - vnútro je uvedená na Obr. 3.20.



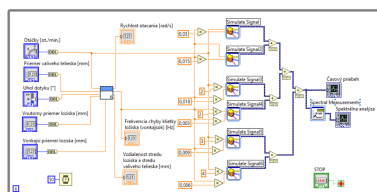
Obr. 3.20: Časový priebeh a spektrálna analýza signálu FTF - vnútro

3.4.2 FTF - frekvencia odpovedajúca chybe kletky ložiska - vonkajšok

Predný panel pre *FTF_lozisko_vonkajsok.vi* je totožný s predným panelom FTF chyby kletky ložiska vo vnútri, viď. Obr.3.18. Nachádza sa na ňom mechanizmus pre nastavenie otáčok v pracovnom okne, mechanizmus pre nastavenie priemeru valivého telieska, vonkajšieho a vnútorného priemeru ložiska, uhlu dotyku valivých teliesok, tlačidlo STOP pre zastavenie behu programu inštrukcie pre korektné používanie programu a dve grafy: jeden pre časový priebeh výstupného signálu a druhý pre spektrálnu analýzu výstupného signálu.

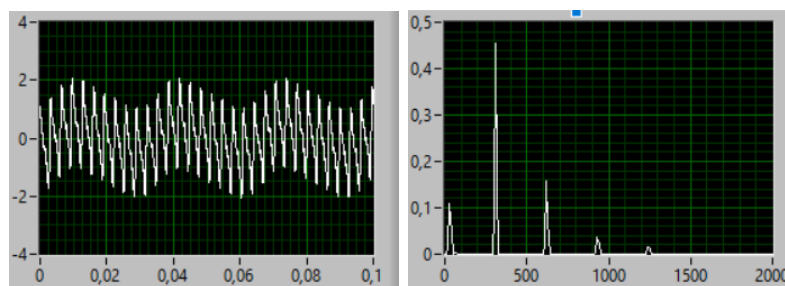
Pri návrhu je smerodatný teoretický rozbor v odseku 1.4 a spektrálna analýza na Obr. 1.8. Blokový diagram *FTF_lozisko_vonkajsok.vi* je uvedený na Obr. 3.21. Princíp funkcie programu je nasledovný. Celý program beží v cykle *While*, a jeho beh je možné zastaviť len pomocou tlačidla STOP. Po nastavení všetkých potrebných parametrov na prednom paneli sa tieto parametre skonvertujú z celočíselného dátového typu *integer (I16)* na dátový typ *double*. Konverzia sa deje z dôvodu lepšieho nastavovania otáčok na prednom paneli, keďže sa lepšie pracuje s celočíselnými hodnotami. Tieto vstupy sú následne pripojené do *FTF_vonkajsok_vypocet(Sub VI).vi*, kde sa vypočíta FTF frekvencia pre vonkajšie poškodenie, vzdialenosť stredu ložiska

a stred valivého ložiska a rýchlosť otáčania. Pre ďalšie výpočty sú však potrebné len FTF frekvencia a otáčky ložiska. Následne na vstupoch šiestich *Simulate Signal Express VI* sú nastavené dva parametre, a to amplitúda signálu a jeho frekvencia. Pri všetkých zdrojoch je amplitúda po násobení konštantami podľa veľkosti spektrálnych zložiek na obrázku 1.8 priamo úmerná otáčkam, frekvencia je úmerná FTF frekvencií s jej jednotlivými násobkami podľa obrázku 1.8. Opäť bol interne vo všetkých troch zdrojoch signálu nastavený šum, pre väčšiu dôveryhodnosť výstupu. Z výstupov týchto zdrojov sa ich sčítaním urobil jeden signál, ten opäť zobrazoval časový priebeh a spektrálnu analýzu spracovanú pomocou *Spectral Measurements Express VI* opäť s rovnakým nastavením ako v predchádzajúcich prípadoch. Takisto sa čaká po každej iterácii cyklu programu 50 milisekúnd. Princíp funkcie je rozdielny len v použitých SubVI vo vnútri programu.



Obr. 3.21: Blokový diagram pre FTF analýzu - vonkajšok

Časový priebeh a spektrálna analýza FTF - vonkajšok je uvedená na Obr. 3.22.

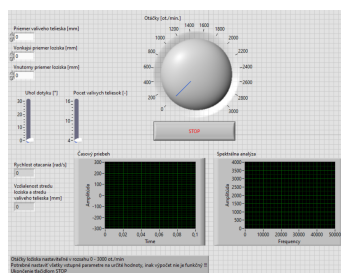


Obr. 3.22: Časový priebeh a spektrálna analýza signálu FTF - vonkajšok

3.4.3 BPFO - frekvencia odpovedajúca chybe vonkajšej drážky ložiska

Predný panel *BPFO_vnutro_a_vonkajsk.vi*, je uvedený na Obr.3.23. Nachádza sa na ňom mechanizmus pre nastavenie otáčok v pracovnom okne, mechanizmus pre nastavenie priemeru valivého telieska, vonkajšieho a vnútorného priemeru ložiska, uhlu dotyku valivých teliesok, počtu valivých teliesok, tlačidlo STOP pre zastavenie

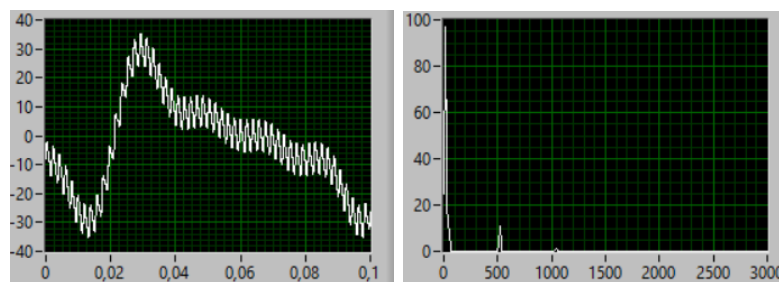
behu programu, inštrukcie pre korektné používanie programu a dve grafy: jeden pre časový priebeh výstupného signálu a druhý pre spektrálnu analýzu výstupného signálu.



Obr. 3.23: Predný panel VI pre BPFO analýzu

Pri návrhu je smerodajný teoretický rozbor v odseku 1.4 a spektrálna analýza na Obr. 1.9. Blokový diagram *BPFO_lozisko_vnutro_a_vonkajšok.vi* je rozložením totožný s blokovými diagramami pre FTF vnútro a vonkajšok na Obr. 3.21. Princíp funkcie programu je nasledovný. Celý program beží v cykle *While*, a jeho beh je možné zastaviť len pomocou tlačidla STOP. Po nastavení všetkých potrebných parametrov na prednom paneli sa tieto parametre skonvertujú z celočíselného dátového typu *integer* (*I16*) na dátový typ *double*. Konverzia sa deje z dôvodu lepšieho nastavovania otáčok na prednom paneli, keďže sa lepšie pracuje s celočíselnými hodnotami. Tieto vstupy sú následne pripojené do *BPFO_frekv_vypocet(Sub VI).vi*, kde sa vypočíta BPFO frekvencia pre vonkajšie poškodenie, vzdialenosť stredu ložiska a stredu valivého ložiska a rýchlosť otáčania. Pre ďalšie výpočty sú však potrebné len BPFO frekvencia a otáčky ložiska. Následne na vstupoch šiestich *Simulate Signal Express VI* sú nastavené dva parametre, a to amplitúda signálu a jeho frekvencia. Pri všetkých zdrojoch je amplitúda po násobení konštantami podľa veľkosti spektrálnych zložiek na obrázku 1.9 priamo úmerná otáčkam, frekvencia je úmerná BPFO frekvencií s jej jednotlivými násobkami podľa obrázku 1.9. Opäť bol interne vo všetkých troch zdrojoch signálu nastavený šum, pre väčšiu dôveryhodnosť výstupu. Z výstupov týchto zdrojov sa ich sčítaním urobil jeden signál, ten opäť zobrazoval časový priebeh a spektrálnu analýzu spracovanú pomocou *Spectral Measurements Express VI* opäť s rovnakým nastavením ako v predchádzajúcich prípadoch. Takisto sa čaká po každej iterácii cyklu programu 50 milisekúnd.

Časový priebeh a spektrálna analýza BPFO je uvedená na Obr. 3.24.

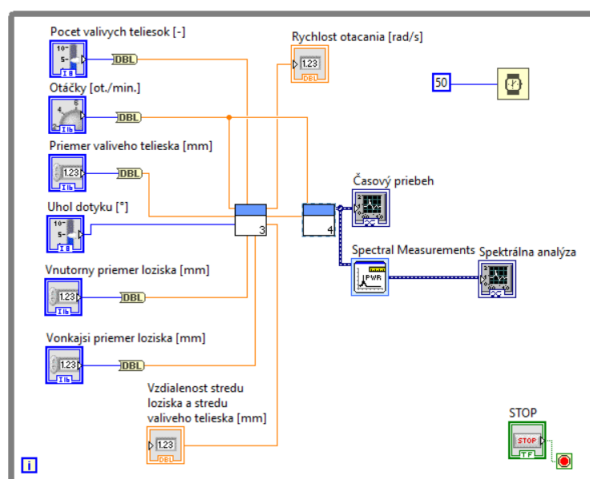


Obr. 3.24: Časový priebeh a spektrálna analýza signálu BPFO

3.4.4 BPFI - frekvencia odpovedajúca chybe vnútornej drážky ložiska

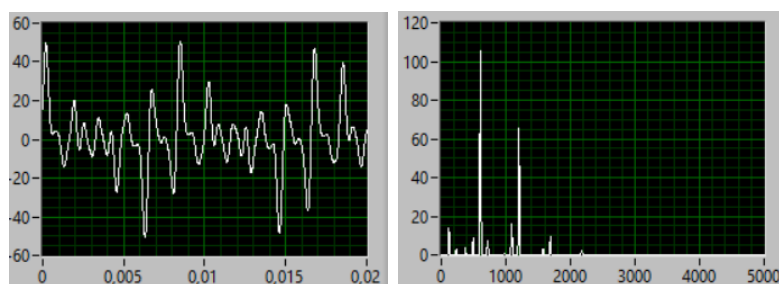
Predný panel *BPFI_lozisko_vnutro_a_vonkajsok.vi*, je uvedený na Obr.3.23, je totižto totožný s panelom pre BPFO. Nachádza sa na ňom mechanizmus pre nastavenie otáčok v pracovnom okne, mechanizmus pre nastavenie priemeru valivého telieska, vonkajšieho a vnútorného priemeru ložiska, uhlu dotyku valivých teliesok, počtu valivých teliesok, tlačidlo STOP pre zastavenie behu programu, inštrukcie pre korektné používanie programu a dve grafy: jeden pre časový priebeh výstupného signálu a druhý pre spektrálnu analýzu výstupného signálu.

Pri návrhu je smerodatný teoretický rozbor v odseku 1.4 a spektrálna analýza na Obr. 1.10. Blokový diagram *BPFI_lozisko_vnutro_a_vonkajsok.vi* je rozložením podobný s blokovým diagramom pre BPFO s malým rozdielom, a to obsahuje ďalšie SubVI. Princíp funkcie programu je nasledovný. Celý program beží v cykle *While*, a jeho beh je možné zastaviť len pomocou tlačidla STOP. Po nastavení všetkých potrebných parametrov na prednom paneli sa tieto parametre konvertujú z celočíselného dátového typu *integer (I16)* na dátový typ *double*. Konverzia sa deje z dôvodu lepšieho nastavovania otáčok na prednom paneli, keďže sa lepšie pracuje s celočíselnými hodnotami. Tieto vstupy sú následne pripojené do *BPFI_frek_vypocet(SubVI).vi*, kde sa vypočíta BPFI frekvencia pre vnútorné poškodenie, vzdialenosť stredu ložiska a stredu valivého ložiska a rýchlosť otáčania. Pre ďalšie výpočty sú však potrebné len BPFI frekvencia a otáčky ložiska. Následne sa tieto parametre potrebné pre ďalšie výpočty využijú v ďalšom SubVI, a to *Pomocny_vypocet_BPFI(SubVI).vi* ktorého správanie je dané Obr. 1.10. Po spracovaní vstupných hodnôt týmto SubVI je na jeho výstupe užitočný signál obsahujúci taktiež šum pre dôveryhodnosť výstupu. Následne tento jeden výstupný signál zobrazoval časový priebeh a spektrálnu analýzu spracovanú pomocou *Spectral Measurements Express VI* s rovnakým nastavením, ako v predchádzajúcich prípadoch. Takisto sa čaká po každej iterácii cyklu programu 50 milisekúnd.



Obr. 3.25: [Blokový diagram pre BPF1]

Časový priebeh a spektrálna analýza BPF1 je uvedená na Obr. 3.26.



Obr. 3.26: Časový priebeh a spektrálna analýza signálu BPF1

3.4.5 BSF - frekvencia odpovedajúca chybe valivého telieska

Predný panel *BSF_lozisko_vnutro_a_vonkajsok.vi*, nie je uvedený na žiadnom obrázku kvôli jeho veľkosti, je však obsiahnutý v prílohách. Nachádza sa na ňom mechanizmus pre nastavenie otáčok v pracovnom okne, mechanizmus pre nastavenie priemeru valivého telieska, vonkajšieho a vnútorného priemeru ložiska, uhlu dotyku valivých teliesok, tlačidlo STOP pre zastavenie behu programu, inštrukcie pre korektné používanie programu a štyri grafy: dve pre časový priebeh výstupného signálu a druhé dve pre spektrálnu analýzu výstupného signálu.

Pri návrhu je smerodatný teoretický rozbor v odseku 1.4 a spektrálna analýza na Obr. 1.11. Blokový diagram *BSF_lozisko_vnutro_a_vonkajsok.vi* je rozdelený do viacerých častí s viacerými SubVI. Princíp funkcie programu je nasledovný. Celý program beží v cykle *While*, a jeho beh je možné zastaviť len pomocou tlačidla

STOP. Po nastavení všetkých potrebných parametrov na prednom paneli sa tieto parametre skonvertujú z celočíselného dátového typu *integer* (I16) na dátový typ *double*. Konverzia sa deje z dôvodu lepšieho nastavovania otáčok na prednom paneli, keďže sa lepšie pracuje s celočíselnými hodnotami. Tieto vstupy sú následne pripojené do *BSF_frek_vypocet(SubVI).vi*, a do *FTF_lozisko_vnutro_pomocka(SubVI).vi* a *FTF_lozisko_vonkajsok_pomocka(SubVI).vi*. Následne sú tieto parametre použité pre ďalšie dve SubVI *Pomocny_vypocet_BSF(SubVI).vi* a zdroje signálu, z ktorých sa následne vypočítajú časové priebehy a spektrálne analýzy pre BSF s použitím vnútrajšku a vonkajšku FTF, podľa Obr. 1.11. Tieto výstupné signály taktiež obsahujú šum pre dôveryhodnosť výstupu. Po každej iterácii cyklu sa čaká 50 milisekúnd. Časové priebehy a spektrálne analýzy budú taktiež dostupné z programu v prílohe, je však potrebné dbať na správne nastavenie podľa legendy pod ovládacími prvkami.

3.5 Programové riešenie pre prevodovky

V nasledujúcich odsekoch bude rozobraný návrh porúch prevodoviek, ako ozubených tak aj planetových.

3.5.1 Nezarovnanie kolies prevodovky

Predný panel *Nezarovnanie_kolies_prevod.vi*, nie je uvedený na žiadnom obrázku kvôli jeho veľkosti, je však obsiahnutý v prílohách. Nachádza sa na ňom mechanizmus pre nastavenie otáčok v pracovnom okne, mechanizmus pre nastavenie počtu zubov väčšieho a menšieho kolesa prevodovky, a tlačidlo STOP pre zastavenie behu programu, inštrukcie pre korektné používanie programu a dve grafy: jeden pre časový priebeh výstupného signálu a druhý pre spektrálnu analýzu výstupného signálu.

Pri návrhu je smerodatný teoretický rozbor v odseku 1.5 a spektrálna analýza na Obr. 1.15. Blokový diagram *Nezarovnanie_kolies_prevod.vi* je rozdelený do viacerých častí s jedným SubVI. Princíp funkcie programu je nasledovný. Celý program beží v cykle *While*, a jeho beh je možné zastaviť len pomocou tlačidla STOP. Po nastavení všetkých potrebných parametrov na prednom paneli sa tieto parametre skonvertujú z celočíselného dátového typu *integer* (I16) na dátový typ *double*. Konverzia sa deje z dôvodu lepšieho nastavovania otáčok na prednom paneli, keďže sa lepšie pracuje s celočíselnými hodnotami. Tieto vstupy sú následne pripojené do *Vypocet_frekvencii_sub(SubVI).vi*. Výstupné parametre tohto SubVI sú potom použité pre ovládanie zdrojov signálu ktoré sú zapojené spôsobom, aby hodnoverne napodobnili spektrálnu analýzu na Obr. 1.15. Spojeím týchto výstupných signálov dostaneme jeden signál, ktorý obsahuje šum pre dôveryhodnosť výstupu. Po každej iterácii cyklu sa čaká 50 milisekúnd. Časové priebehy a spektrálne analýzy budú

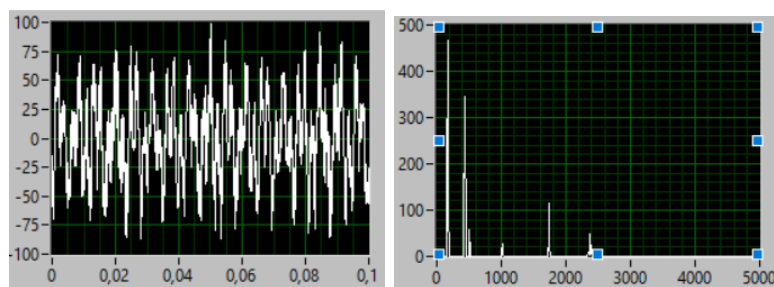
taktiež dostupné z programu v prílohe, je však potrebné dbať na správne nastavenie podľa legendy pod ovládacími prvkami.

3.5.2 Poškodenie zubov prevodovky

Predný panel *Poškodenie_zubov_prevod.vi*, nie je uvedený na žiadnom obrázku kvôli jeho veľkosti, je však obsiahnutý v prílohách. Nachádza sa na ňom mechanizmus pre nastavenie otáčok v pracovnom okne, mechanizmus pre nastavenie počtu zubov väčšieho a menšieho kolesa prevodovky, počtu poškodených zubov väčšieho a menšieho kolesa prevodovky a tlačidlo STOP pre zastavenie behu programu, inštrukcie pre korektné používanie programu a dve grafy: jeden pre časový priebeh výstupného signálu a druhý pre spektrálnu analýzu výstupného signálu.

Pri návrhu je smerodatný teoretický rozbor v odseku 1.5 a spektrálna analýza na Obr. 1.16. Blokový diagram *Poškodenie_zubov_prevod.vi* je rozdelený do viacerých častí s jedným SubVI. Princíp funkcie programu je nasledovný. Celý program beží v cykle *While*, a jeho beh je možné zastaviť len pomocou tlačidla STOP. Po nastavení všetkých potrebných parametrov na prednom paneli sa tieto parametre skonvertujú z celočíselného dátového typu *integer* (*I16*) na dátový typ *double*. Konverzia sa deje z dôvodu lepšieho nastavovania otáčok na prednom paneli, keďže sa lepšie pracuje s celočíselnými hodnotami. Správanie tohto programu je v podstate ako prevodovka za normálneho chodu so silnými dorazmi pri prechádzaní cez poškodené zuby. Výstupný signál obsahuje šum pre dôveryhodnosť výstupu. Po každej iterácii cyklu sa čaká 50 milisekúnd.

Časový priebeh a spektrálna analýza poškodenia zubov prevodovky je uvedená na Obr. 3.27.



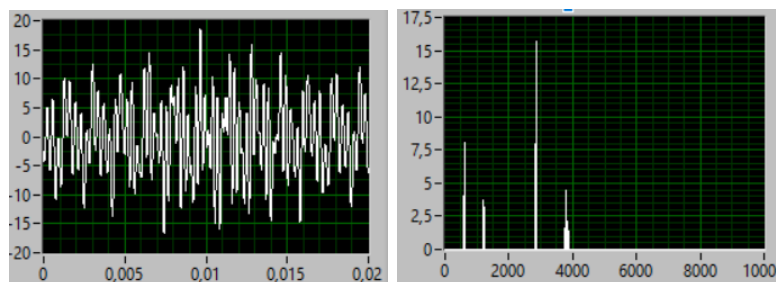
Obr. 3.27: Časový priebeh a spektrálna analýza signálu poškodených zubov prevodovky

3.5.3 Zataženie zubov prevodovky

Predný panel *Zataženie_zubov_prevod.vi*, nie je uvedený na žiadnom obrázku kvôli jeho veľkosti, je však obsiahnutý v prílohách. Nachádza sa na ňom, mechanizmus pre nastavenie otáčok v pracovnom okne, mechanizmus pre nastavenie počtu zubov väčšieho a menšieho kolesa prevodovky a tlačidlo STOP pre zastavenie behu programu, inštrukcie pre korektné používanie programu a dve grafy: jeden pre časový priebeh výstupného signálu a druhý pre spektrálnu analýzu výstupného signálu.

Pri návrhu je smerodatný teoretický rozbor v odseku 1.5 a spektrálna analýza na Obr. 1.14. Blokový diagram *Zataženie_zubov_prevod.vi* je rozdelený do viacerých častí s jedným SubVI. Princíp funkcie programu je nasledovný. Celý program beží v cykle *While*, a jeho beh je možné zastaviť len pomocou tlačidla STOP. Po nastavení všetkých potrebných parametrov na prednom paneli sa tieto parametre skonvertujú z celočíselného dátového typu *integer* (*I16*) na dátový typ *double*. Konverzia sa deje z dôvodu lepšieho nastavovania otáčok na prednom paneli, keďže sa lepšie pracuje s celočíselnými hodnotami. Správanie tohto programu je popísané spektrálnou analýzou na Obr. 1.14. Výstupný signál obsahuje šum pre dôveryhodnosť výstupu. Po každej iterácii cyklu sa čaká 50 milisekúnd.

Časový priebeh a spektrálna analýza poškodenia zubov prevodovky je uvedená na Obr. 3.28.



Obr. 3.28: Časový priebeh a spektrálna analýza signálu preťaženia zubov prevodovky

3.5.4 Planetové prevodovky

Predný panel *Zataženie_zubov_prevod.vi*, nie je uvedený na žiadnom obrázku kvôli jeho veľkosti, je však obsiahnutý v prílohách. Nachádza sa na ňom mechanizmus pre nastavenie otáčok v pracovnom okne, mechanizmus pre nastavenie počtu zubov centrálného, korunového a satelitného kolesa s možnosťou zvolenia počtu satelitných kolies v prevodovke, tlačidlo STOP pre zastavenie behu programu a inštrukcie pre korektné používanie programu.

Pri návrhu je smerodajný teoretický rozbor v odseku 1.5.2 a vzťahy pre výpočet v tomto odseku obsiahnuté. Blokový diagram *Planetova_poruchove_frekv.* je rozdelený do viacerých častí s jedným SubVI. Princíp funkcie programu je nasledovný. Celý program beží v cykle *While*, a jeho beh je možné zastaviť len pomocou tlačidla STOP. Po nastavení všetkých potrebných parametrov na prednom paneli sa tieto parametre skonvertujú z celočíselného dátového typu *integer (I16)* na dátový typ *double*. Konverzia sa deje z dôvodu lepšieho nastavovania otáčok na prednom paneli, keďže sa lepšie pracuje s celočíselnými hodnotami. Časový priebeh a spektrálnu analýzu planetovej prevodovky pri poruchách sa vzhľadom na obtiažnosť nepodarilo získať, ale vypočítali sme, akými frekvenciami sa prejavujú poškodenia na všetkých častiach planetovej prevodovky v závislosti na vstupných parametroch.

Záver

V teoretickej časti bakalárskej práce (prvá kapitola) bolo úlohou vyhotovenie rešerše k téme Simulátor typických porúch súčastí rotačných zariadení. Preštudovali sme danú problematiku z dodanej a nami získanej literatúry. Z tejto literatúry sme vybrali a teoreticky spracovali najčastejšie sa vyskytujúce poruchy požadovaných súčastí, a získali sme patričný prehľad v novej problematike. Získané znalosti sú uplatnené pri samotnom návrhu simulátora.

V druhej časti sme navrhli spôsob, akým budeme navrhovať knižnicu pre našťudované súčasti tak, aby výstup simulátora preštudovaných porúch bol čo najhodnovernejší, a tak budúcim užívateľom poskytol relevantné a spoľahlivé informácie.

V hlavnej časti tejto práce sme mali za úlohu navrhnuť daný simulátor mechanických súčastí. Pri simulovaní nevyváhy, ohnutého hriadeľa, nezarovnaných dvoch mechanických súčastí a klasikom prevode dostávame na výstupe dáta ktorých výstup je porovnateľný s dátami dostupnými z literatúry. Pri simulácií valivých ložísk a poškodenia planetovej prevodovky výstup nie je úplne uspokojujúci.

Táto práca poskytuje možnosti rozširovania o ďalšie mechanické súčasti s novými poruchami ako aj úpravu terajších. Pri zložitejších mechanických súčastiach a ich poruchách nie je jednoduché používať túto knižnicu, validné dáta sa dajú získať len pri splnení určitých vstupných podmienok.

Literatúra

- [1] GIRDHAR, Paresh. *Practical machinery vibration analysis and predictive maintenance*. Elsevier, 2004. ISBN 978-0750662758.
- [2] TAYLOR, James I. *I. The Vibration Analysis Handbook, druhá edícia*. Vibration Consultants, 2003. ISBN 978-0964051720.
- [3] KREIDL, Marcel, ŠMÍD, Radislav. *Technická diagnostika - senzory, metody, analýza signálu*. Praha, BEN, 2006. ISBN 80-7300-158-6.
- [4] TŮMA, Jiří. *Zpracování signálu získaných z mechanických systémů užitím FFT*. VŠB, 1997. ISBN 80-901936-1-7.
- [5] CHILDS, Peter R. N. *Mechanical Design Engineering Handbook*. Elsevier, 2013. ISBN 978-0080977591.
- [6] RESHETOV, D. N. *Machine design (preklad z ruštiny)*. Central Books, 1979. ISBN 978-0714712949.
- [7] JURA, Pavel. *Signály a systémy: Část 3: Diskrétní signály a diskrétní systémy*. Tretie opravné vydanie. 2017.
- [8] *Rozšířený LabVIEW Help k Simulate Sig Express VI* [online]. [cit. 07. 06. 2019]. Dostupné z URL: <https://zone.ni.com/reference/en-XX/help/371361R-01/lvexpress/simulate_signal/>
- [9] JAN, Jiří. *Číslíková filtrace, analýza a restaurace signálu*. 2. rozšířené vydání. Brno: VUTUM, 2002. ISBN 80-214-1558-4.
- [10] FERNANDEZ, A.: *Typické poruchy ložisek a ich spektrálna identifikácia* [online]. [cit. 08. 06. 2019]. Dostupné z URL: <<https://power-mi.com/content/typical-bearing-defects-and-spectral-identification>>
- [11] FERNANDEZ, A.: *Frekvencie prevodoviek* [online]. [cit. 08. 06. 2019]. Dostupné z URL: <<https://power-mi.com/content/frequencies-gear-assembly>>
- [12] *Rozšířený LabVIEW Help k Waveform Chart a Waveform Graph* [online]. [cit. 07. 06. 2019]. Dostupné z URL: <https://zone.ni.com/reference/en-XX/help/371361R-01/lvconcepts/types_of_graphs_and_charts/>
- [13] *Rozšířený LabVIEW Help k Spectral Measurements Express VI* [online]. [cit. 07. 06. 2019]. Dostupné z URL: <https://zone.ni.com/reference/en-XX/help/371361R-01/lvexpress/spectral_measurements/>

- [14] FERNANDEZ, A.: *Riešenie problémov prevodoviek* [online].
[cit. 08.06.2019]. Dostupné z URL: <<https://power-mi.com/content/troubleshooting-gears>>

Zoznam symbolov, veličín a skratiek

FFT	rýchla Fourierova transformácia – Fast Fourier Transform
PIA	rotačná os otáčania – principle inertia axis
GCL	geometrická os otáčania – geometric centerline
FTF	frekvencia odpovedajúca chybe kletky ložiska – fundamental train frequency
BPFI	frekvencia odpovedajúca chybe drážky pre valivé teleso - vonkajšia – ball pass frequency of the inner race
BPFO	frekvencia odpovedajúca chybe drážky pre valivé teleso - vnútorná – ball pass frequency of the outer race
BSF	frekvencia odpovedajúca chybe valivého telieska – ball spin frequency
GMF	frekvencia stretávania sa zubov – gear mesh frequency
CAD	počítačom podporovaný návrh – Computer-aided design
VI	Virtuálny Inštrument – Virtual Instrument

A Obsah online prílohy a priloženého CD

Na CD médiu sa nachádza softvér bakalárskej práce na tému „Simulátor typických poruch súčastí rotačných zařízení“, autor Matej Valko. Softvér je vytvorený v prostredí LabVIEW od spoločnosti National Instruments, verzia 2019 SP1.

Vibracie_sucasti.lvlib.....	knížnica pre mechanické súčasti
└─ Klasický prevod	adresár
└─ Nezarovnanie_kolies_prevod.vi	
└─ Poskodenie_zubov_prevod.vi	
└─ Vypocet_frekvencii_sub(SubVI).vi	
└─ Zatazenie_zubov_prevod.vi	
└─ Nevýváža	adresár
└─ Ohnuta_hriadel_kraj.vi	
└─ Ohnuta_hriadel_stred.vi	
└─ Parove_nevyvazenie.vi	
└─ Staticke_nevyvazenie.vi	
└─ Nezarovnanie	adresár
└─ Paralelne_nezarovnanie.vi	
└─ Uhlove_nezarovnanie.vi	
└─ Planetová prevodovka.....	adresár
└─ Planetova_poruchove_frekv.vi	
└─ Vypocet_rychlosti_planetova(SubVI).vi	
└─ Valivé ložiská.....	adresár
└─ BPFI_frekv_vypocet(SubVI).vi	
└─ BPFI_lozisko_vnutro_a_vonkajsok.vi	
└─ BPFO_frekv_vypocet(SubVI).vi	
└─ BPFO_lozisko_vnutro_a_vonkajsok.vi	
└─ BSF_frekv_vypocet(SubVI).vi	
└─ BSF_lozisko_vnutro_a_vonkajsok.vi	
└─ FTF_lozisko_vnutro.vi	
└─ FTF_lozisko_vnutro_pomocka(SubVI).vi	
└─ FTF_lozisko_vonkajsok.vi	
└─ FTF_lozisko_vonkajsok_pomocka(SubVI).vi	
└─ FTF_vonkajsok_vypocet(SubVI).vi	
└─ Pomocny_vypocet_BPFI(SubVI).vi	
└─ Pomocny_vypocet_BSF(SubVI).vi	